



**Nuno Fernando
Lopes de Melo**

**Durabilidade de betões com metacaulino - propagação
de cloretos**



**Nuno Fernando
Lopes de Melo**

**Durabilidade de betões com metacaulino –
propagação de cloretos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Barreto Cachim, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e da Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã pelo apoio incondicional que me deram ao longo de toda a minha vida e a ti, Rita, por estares sempre presente.

o júri

presidente

Professor Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite Camões de Azevedo
Professor auxiliar da Universidade do Minho

Professor Doutor Paulo Barreto Cachim
Professor associado da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Com a conclusão deste trabalho encerra-se também uma fase da minha vida que, pelas pessoas que dela fizeram parte, vou para sempre recordar com carinho e saudade.

Quero expressar um profundo agradecimento ao Professor Paulo Cachim pela disponibilidade, orientação, motivação e paciência ao longo destes meses.

À Professora Ana Luísa Velosa pela coorientação e conhecimento comigo partilhado.

Deixo também o meu muito obrigado à Engenheira Maria Carlos Figueiredo e ao Vítor Rodrigues pela ajuda, disponibilidade e conhecimento, sem os quais a realização deste trabalho teria sido bastante mais complicada.

A todos os colegas e amigos que me acompanharam e apoiaram durante longos meses de trabalho no laboratório do Departamento de Engenharia Civil, nomeadamente Ricardo e Daniel, um grande obrigado.

Aos meus melhores amigos, Telmo e Marco, com quem tive o prazer de partilhar todos estes anos de trabalho e diversão.

A toda a minha família, pelo carinho sempre demonstrado.

À minha irmã e cunhado, por serem exatamente como são e por me apoiarem e motivarem sempre e em todas as circunstâncias.

A ti, Rita, por seres a melhor pessoa que conheço, por estares sempre ao meu lado, por me desafiares a ser sempre melhor, pelo teu carinho, amizade e amor.

Finalmente, aos meus pais, obrigado por tudo. Não poderia ter pedido melhor sorte do que a que tenho ao ter-vos como pais. Obrigado pelo apoio, pelos sacrifícios que fazem por mim e pela educação e formação que sempre me deram.

A todos, o meu muito obrigado.

palavras-chave

betão, metacaulino, cloretos, durabilidade, modelo, coeficiente de difusão, migração

resumo

Devido ao enorme aumento no número de casos de degradação precoce em estruturas de betão, é de extrema importância conhecer e compreender os mecanismos que atuam de forma prejudicial neste material.

O metacaulino tem, ao longo das últimas décadas, vindo a ser cada vez mais utilizado no betão em substituição do cimento Portland tradicional, com o principal objetivo de melhorar a sua durabilidade, nomeadamente na resposta aos ataques de cloretos.

A atuação dos cloretos no betão pode ser estudada com recurso a diversos ensaios laboratoriais ou *"in situ"* ou estimada através de modelos de durabilidade. Neste estudo foram efetuados três ensaios com durações e mecanismos de transporte distintos, para além dos habituais ensaios de caracterização do betão.

Os ensaios foram realizados para três composições de betão distintas, com 0% (referência), 10% e 20% de substituição por metacaulino.

Concluiu-se que a substituição de parte do cimento por metacaulino afeta positivamente todas as características do betão estudadas nomeadamente a resistência à compressão, a absorção de água e a resistência à penetração de cloretos.

Desta forma, demonstrou-se, como desejado, o benefício proveniente da substituição de cimento por metacaulino na proteção contra ataques de cloretos.

keywords

concrete, metakaolin, chloride, durability, model, diffusion coefficient, migration.

abstract

Due to the large increase in the number of cases of early degradation in concrete structures it is extremely important to know and understand the harmful mechanisms that act upon this material.

Over the past decades, metakaolin has been increasingly used in concrete replacing the traditional Portland cement, with the main objective of improving its durability, particularly concerning chloride attack.

The influence of chloride penetration in concrete may be studied by using several laboratory or "*in situ*" tests or estimated through durability models. In this study, three tests with different transport mechanisms and durations were performed, in addition to the usual concrete characterization tests.

The tests were made for three distinct concrete compositions, with 0% (reference), 10% and 20% of metakaolin substitution.

It has been concluded that the partial substitution of cement by metakaolin positively affects all the studied concrete characteristics, namely compressive strength, water absorption and resistance to chloride penetration.

This way, as intended, the benefit from the substitution of cement by metakaolin in the protection against chloride attacks has been demonstrated.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Motivação	1
1.3.	Objetivos.....	2
1.4.	Organização da dissertação.....	3
2.	O metacaulino	5
3.	A ação dos cloretos no betão	9
3.1.	Fontes de cloretos	9
3.2.	Fatores que influenciam o ingresso de cloretos	9
3.3.	Mecanismos de transporte de cloretos.....	10
3.3.1.	Absorção por capilaridade.....	11
3.3.2.	Permeabilidade	12
3.3.3.	Difusão	13
3.3.4.	Migração	14
3.4.	Sal de Friedel.....	16
4.	Ensaio de penetração de cloretos.....	17
4.1.	Ensaio de Difusão	17
4.1.1.	Ensaio de Imersão (NT BUILD 443).....	17
4.1.2.	AASHTO T259 – “Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration”	18
4.1.3.	Método da célula de difusão.....	19
4.1.4.	Penetração por Pressão.....	20
4.2.	Ensaio de Migração.....	20
4.2.1.	ASTM C1202 - “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”	20
4.2.2.	Ensaio de Migração Rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test)	22
4.3.	Ensaio de Resistividade.....	23
4.3.1.	Dois Elétrodos (Laboratorial)	24
4.3.2.	Array de Wenner (“ <i>in situ</i> ”)	24

4.4.	Considerações Adicionais	25
5.	Procedimento Experimental.....	27
5.1.	Introdução	27
5.2.	Materiais	27
5.2.1.	Cimento	27
5.2.2.	Agregados.....	28
5.2.3.	Metacaulino	30
5.2.4.	Superplastificante	30
5.3.	Formulação do Betão.....	31
5.3.1.	Produção, consistência e cura.....	33
5.4.	Ensaio realizado	34
5.4.1.	Densidade aparente e densidade real	34
5.4.2.	Resistência à compressão	36
5.4.3.	Ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons.....	37
5.4.4.	Absorção de água.....	39
5.4.5.	Ensaio de migração rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test).....	41
5.4.6.	Método da célula de difusão	45
5.4.7.	Ensaio de imersão	47
5.5.	Resultados, Análise e Discussão	50
5.5.1.	Densidade aparente e densidade real	50
5.5.2.	Resistência à compressão	51
5.5.3.	Ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons.....	53
5.5.4.	Absorção de água.....	54
5.5.5.	Ensaio de migração rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test).....	58
5.5.6.	Método da célula de difusão	60
5.5.7.	Ensaio de imersão	64
6.	Modelos de durabilidade	68
6.1.	Introdução	68
6.2.	Definições	69

6.3.	Modelos de propagação de cloretos no betão	70
6.3.1.	Modelo de Xi e Bazant.....	70
6.3.2.	Modelo Hetek	72
6.3.3.	Modelo de Tutti	72
6.4.	Aplicação do modelo de propagação de cloretos no betão	77
7.	Conclusões.....	82
7.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	83
	Referências bibliográficas	85
	Anexo I.....	i
	Anexo II.....	ii
	Anexo III	iii
	Anexo IV	iv
	Anexo V	v
	Anexo VI.....	vi
	Anexo VII.....	ix
	Anexo VIII	xii
	Anexo IX.....	xviii

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Difusão de cloretos para argamassas com CEM I 42,5, metacaulino e caulino (Siddique & Klaus, 2009).....	7
Tabela 2: Coeficientes de difusão de cloretos para diferentes composições de betão (Bioubakhsh, 2011).....	10
Tabela 3: Permeabilidade a cloretos com base na carga passada no betão (Grace, 2006).....	22
Tabela 4: Quadro-resumo dos métodos de determinação de penetração de cloretos no betão	26
Tabela 5 – Propriedades químicas do cimento	27
Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento	27
Tabela 7 – Resistências mecânicas do cimento	28
Tabela 8 - Propriedades químicas do Argical-M1000	30
Tabela 9 - Propriedades físicas do Argical-M1000	30
Tabela 10 - Propriedades do Sikament® 400 Plus	31
Tabela 11 - Composição base do betão.....	31
Tabela 12 – Razão A/C e percentagem de superplastificante das composições de betão	32
Tabela 13 – Resultados do ensaio de abaixamento do betão	33
Tabela 14 – Descrição da dimensão e número de provetes utilizados para os ensaios	34
Tabela 15 – Relação entre a velocidade de onda ultrassónica e o módulo de elasticidade (Farnell, 2004)	39
Tabela 16 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração (LNEC, 2004)	42
Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão	51
Tabela 18 – Resultados do ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultrassons	54
Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	55
Tabela 20 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade	56

Tabela 21 – Resultados da ascensão capilar pelo ensaio de absorção de água por capilaridade	57
Tabela 22 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 90 dias para o ensaio CTH	58
Tabela 23 – Coeficientes de difusão e concentração superficial de cloretos aos 90 dias para o ensaio de imersão	66
Tabela 24 – Valores para o parâmetro k_{temp} , referente ao betão (LNEC, 2007).....	74
Tabela 25 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para o cálculo de C_s (LNEC, 2007).....	74
Tabela 26 – Valores para os parâmetros $k_{D,c}$ e $k_{D,RH}$ (LNEC, 2007).....	75
Tabela 27 – Valores para o parâmetro $k_{D,T}$ (LNEC, 2007).....	75
Tabela 28 – Valores para o parâmetro n (LNEC, 2007)	75
Tabela 29 – Valores de I_{corr} para cálculo do tempo de propagação (LNEC, 2007).....	77
Tabela 30 – Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar (LNEC, 2007).....	77
Tabela 31 – Corrosão induzido por cloretos da água do mar (LNEC, 2007).....	78
Tabela 32 – Parâmetros para determinação do teor em cloretos nos betões	79
Tabela 33 – Granulometria dos agregados utilizados na produção do betao	i
Tabela 34 – Composição do betão	i
Tabela 35 – Resultados do ensaio de determinação da densidade aparente.....	ii
Tabela 36 – Resultados do ensaio de determinação da densidade real.....	ii
Tabela 37- Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 1	iii
Tabela 38 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 2	iii
Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 3	iii
Tabela 40 – Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 1	iv
Tabela 41- Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 2	iv

Tabela 42 - Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 3	iv
Tabela 43 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	v
Tabela 44 – Massa dos provetes registada para o ensaio de absorção de água por capilaridade v	
Tabela 45 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade	v
Tabela 46 – Valores de ascensão de água por capilaridade para o ensaio de absorção de água por capilaridade	v
Tabela 47 – Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 1	vi
Tabela 48 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 2	vi
Tabela 49 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 3	vii
Tabela 50 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 1	vii
Tabela 51 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 2	viii
Tabela 52 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 3	viii
Tabela 53 – Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 1	ix
Tabela 54 - Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 2	x
Tabela 55 - Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 3	xi
Tabela 56 – Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 1	xii
Tabela 57 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 1	xii
Tabela 58 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 1	xiii
Tabela 59 - Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 2	xiii
Tabela 60 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 2	xiv

Tabela 61 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 2	xiv
Tabela 62 - Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 3	xv
Tabela 63 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 3	xv
Tabela 64 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 3	xvi
Tabela 65 – Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 1	xvi
Tabela 66 - Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 2	xvi
Tabela 67 - Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 3	xvii
Tabela 68 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 1	xviii
Tabela 69 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 2	xviii
Tabela 70 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 3	xix

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Metacaulino	5
Figura 2- Representação da preparação do ensaio AASHTO T259	19
Figura 3 – Ensaio da célula de difusão	19
Figura 4 - Representação esquemática do ensaio de penetração por pressão (Stanish et al., 1997)	20
Figura 5 - Representação esquemática do ensaio ASTM C1202 (Stanish et al., 1997)	21
Figura 6 - Representação esquemática do ensaio CTH (Spiesz & Brouwers, 2012).....	23
Figura 7 - Dispositivo para determinação de resistividade (Stanish et al., 1997)	24
Figura 8 - Esquema do Ensaio de Array de Wenner (Stanish et al., 1997).....	25
Figura 9 – Curva de distribuição granulométrica da brita 8/12.....	28
Figura 10 – Curva de distribuição granulométrica da brita 12/25	29
Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica da areia grossa	29
Figura 12 - Curva de distribuição granulométrica da areia fina	29
Figura 13 – Curvas granulométricas dos componentes do betão	31
Figura 14 – Equipamento utilizado na mistura do betão.....	33
Figura 15 – Ensaio de abaixamento do betão.....	33
Figura 16 – Provetes de betão fresco	34
Figura 17 – Ensaio de Arquimedes.....	35
Figura 18 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão	36
Figura 19 – Provede após ensaio de resistência à compressão	36
Figura 20 – Modos de rotura satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN-12390-3	36
Figura 21 - Modos de rotura não satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN-12390-3	36

Figura 22 – Aparelho de medição da velocidade de propagação por ultra-sons	37
Figura 23 – Tipos de leitura da velocidade de propagação de ultra-sons	38
Figura 24 – Ensaio de absorção de água por capilaridade	40
Figura 25 – Preparação da amostra em câmara de vácuo	42
Figura 26 – Ensaio de migração de cloretos (CTH)	42
Figura 27 – Pormenor da penetração de cloretos no betão	43
Figura 28 - Medição da penetração de cloretos	43
Figura 29 –Montagem do ensaio da célula de difusão.....	45
Figura 30 – Ensaio da célula de difusão.....	45
Figura 31 – Analisador multi-parâmetros para determinação de teor em cloretos.....	46
Figura 32 – Amostras de betão	48
Figura 33 – Preparação das amostras de betão para análise de cloretos	48
Figura 34 – Processo de diluição de cloretos	48
Figura 35 – Densidade Aparente	50
Figura 36 – Densidade Real	51
Figura 37 – Resistência à compressão	52
Figura 38 – Evolução da resistência à compressão.....	53
Figura 39 – Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d	54
Figura 40 – Absorção de água por imersão	55
Figura 41 – Absorção de água por capilaridade	56
Figura 42 – Ascensão capilar no betão ao longo do tempo.....	57
Figura 43 – Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias para o ensaio CTH	59
Figura 44 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 90 dias para o ensaio CTH.....	60
Figura 45 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 1 – Amostra 1)	61

Figura 46 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 1 – Amostra 2)	61
Figura 47 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 2 – Amostra 1)	62
Figura 48 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 2 – Amostra 2)	62
Figura 49 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 3 – Amostra 1)	62
Figura 50 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 3 – Amostra 2)	63
Figura 51 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 1 para o ensaio de imersão	64
Figura 52 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 2 para o ensaio de imersão	64
Figura 53 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 3 para o ensaio de imersão	65
Figura 54 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 90 dias para o ensaio de imersão	66
Figura 55 – Coeficiente de difusão em função da percentagem de metacaulino	67
Figura 56 - Modelo de vida útil de uma estrutura sujeita a corrosão (Zhang & Lounis, 2006)	73
Figura 57 - Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 1)	80
Figura 58 – Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 2)	80
Figura 59 - Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 3)	80

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Ao longo das últimas décadas têm vindo a aumentar as preocupações relativas à durabilidade das estruturas de betão. Sendo este o material mais utilizado na construção e, tendo sido verificado um enorme aumento de casos de degradação precoce, o estudo da durabilidade deste material assume uma importância fulcral na indústria.

Um dos agentes que pode provocar maior degradação e desgaste em estruturas de betão são os cloretos. Estes iões entram em contacto com o betão através da água do mar, névoa salina ou sal de degelo. A sua ação pode levar à corrosão das armaduras e à consequente fissuração do betão (Figueiredo, 2011).

Posto isto, torna-se essencial a realização de ensaios laboratoriais para aferir sobre as características do betão, nomeadamente a sua resistência às ações dos cloretos, bem como o desenvolvimento de modelos de propagação dos mesmos.

Durante o século XX e início do século XXI tem-se assistido a um aumento exponencial na utilização de adjuvantes e aditivos no betão com os principais objetivos a serem a diminuição de custos de produção e, por outro lado, a melhoria das características do betão, aumentando a sua durabilidade e trabalhabilidade. O metacaulino é um material pozolânico obtido por tratamento térmico e moagem de caulino que, a par de outros como sílicas de fumo, cinzas de casca de arroz e cinzas volantes, tem sido progressivamente incorporado na produção de betão.

O estudo de diferentes composições de betão tem sido exaustivo e tem levado ao desenvolvimento de novas soluções que melhoram significativamente as características do betão tradicional.

Estudos efetuados comprovam a melhoria do comportamento do betão quando, à sua composição, se adiciona metacaulino, com destaque para a grande melhoria verificada na resistência aos ataques de cloretos (Boddy, Hooton, & Gruber, 2001).

1.2. Motivação

Sendo a ação de cloretos uma das grandes causas de degradação de estruturas de betão é, sem dúvida, importante perceber a sua forma de atuação e as consequências que desta podem advir

caso esta problemática não seja devidamente estudada e tida em conta na projeção de vida útil das estruturas. Tanto profissionais do setor como estudantes da área da engenharia devem ter presente que as estruturas são sujeitas a ambientes e condições agressivas sendo, desse modo, necessário um profundo conhecimento dos materiais a utilizar e do seu possível comportamento em todas as circunstâncias de forma a garantir maior durabilidade.

Por outro lado e, com a crescente consciencialização dos problemas ambientais provocados pela indústria da construção, procuram-se cada vez mais, soluções ecologicamente interessantes e que, ao mesmo tempo que reduzem o impacto imediato na poluição gerada, o façam também a longo prazo, ajudando na criação de estruturas mais duráveis. O metacaulino é um dos materiais que se enquadra nesta descrição e, deste modo, torna-se bastante pertinente o seu melhor conhecimento e das vantagens que advém da sua utilização.

1.3. Objetivos

O principal objetivo do trabalho passa pelo estudo do comportamento do betão quando à sua composição é adicionado metacaulino. O trabalho é centrado, principalmente, no estudo da resistência à penetração de cloretos no entanto, será também estudada a influência da adição de metacaulino em diferentes características do betão nomeadamente a resistência à compressão, a absorção de água por imersão e capilaridade e a densidade.

Desta forma, irão ser realizadas três composições de betão com diferentes percentagens de substituição de cimento por metacaulino, com 0% (betão referência), 10% e 20% do material. De forma a poder comparar os resultados obtidos para as diferentes composições, irão manter-se inalterados os restantes fatores que influenciam a as características do betão, nomeadamente a razão água-cimento.

Irá ser levados a cabo ensaios de resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade, ensaios de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons, densidade real e aparente e, para o estudo da propagação de cloretos serão ainda realizados três ensaios: o ensaio de migração rápida (CTH Rapid Test Method), o ensaio da célula de difusão e o ensaio de imersão em solução de cloretos.

Após a realização dos ensaios, irá proceder-se ao cálculo dos coeficientes de difusão de cloretos obtidos para cada ensaio relativamente a cada composição de betão e, relacionando os resultados obtidos, concluir qual a melhor solução na melhoria da resistência ao ataque de cloretos.

Irá também ser aplicado um modelo teórico de propagação de cloretos no betão, apresentado na especificação E465 do LNEC (2007) cujos resultados se pretendem comparar e relacionar com os obtidos experimentalmente.

1.4. Organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por 7 capítulos. No capítulo 1 é feito um enquadramento ao tema desenvolvido e a motivação para o mesmo. Apresentam-se ainda os objetivos propostos para a dissertação e a sua estrutura.

No capítulo 2 é feita uma apresentação do metacaulino como material de substituição do ligante no betão ao mesmo tempo que são especificadas as suas principais características e vantagens.

No terceiro capítulo é abordada a ação dos cloretos no betão especificando a sua origem, os fatores que influenciam o seu ingresso no betão e os mecanismos de transporte no mesmo.

No capítulo 4 são apresentados diferentes ensaios de penetração de cloretos no betão, divididos em três géneros, de acordo com o modo de ingresso dos iões cloretos.

O capítulo 5, o mais extenso, encontra-se dividido em cinco subcapítulos onde se apresenta todo o procedimento experimental realizado. Especificam-se os materiais utilizados, bem como os ensaios realizados. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos e discutem-se os mesmos.

No capítulo 6 é feita uma abordagem aos modelos de durabilidade, especificando três modelos de propagação de cloretos e fazendo a aplicação prática de um deles.

No sétimo e último capítulo são sintetizadas as principais conclusões retiradas do trabalho realizado e feitas algumas sugestões relativamente a trabalhos futuros que possam ajudar a complementar e aprofundar o estudo realizado nesta dissertação.

2. O METACAULINO

De acordo com Siddique & Klaus (2009), o metacaulino ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) é um material pozolânico obtido através da calcinação de argilas cauliníticas a temperaturas entre 500° e 800°.

A calcinação das argilas é responsável pela atividade pozolânica devido à formação de metacaulinite (Tavares, 2008).



Segundo Figueiredo (2011), os principais produtores mundiais de caulino são os Estados Unidos da América, o Brasil e a generalidade dos países asiáticos. Na Europa, os grandes produtores deste material são o Reino Unido, a Alemanha e a República Checa.



Figura 1 - Metacaulino

Estudos realizados nos últimos anos, nomeadamente por Poon, Kou & Lam (2006), Camões, Cruz, Jalali & Ferreira (2004) e Qian & Li (2001), revelam que para além de apresentar várias aplicações na indústria da produção do betão (betão de alto desempenho, alta resistência e betão leve, fibrocimento, betão pré-fabricado, betão reforçado com fibra de vidro, argamassas e rebocos) este apresenta ainda diversas mais-valias quando comparado com o betão tradicional.

Segundo Figueiredo (2011), citando Siddique & Klaus (2009), o uso do metacaulino no fabrico do betão tem como principais vantagens:

- Aumento da resistência à compressão e flexão;
- Permeabilidade reduzida;
- Melhorias no acabamento, na cor e na aparência;

- Aumento da durabilidade;
- Efeito da reação alcalis-sílica (RAS) reduzida;
- Retração reduzida devido ao efeito de empacotamento das partículas, aumentando a densidade do betão;
- Acabamento e trabalhabilidade aumentados;
- Potencial para aparecimento de eflorescências reduzido;
- Aumento da resistência ao ataque químico.

Diversos estudos, nomeadamente por Siddique & Klaus (2009) e Ramezaniapour & Bahrami Jovein (2012) concluíram que diversas características do betão são melhoradas por influência direta da incorporação de metacaulino na sua composição.

De acordo com Tavares (2008), a substituição parcial do cimento Portland por metacaulino ocasiona, devido ao efeito microfíler, um acréscimo imediato na resistência do betão, e um efeito posterior devido à ação pozolânica.

Este facto deve-se à sua capacidade de reagir rápida e eficazmente com o hidróxido de cálcio, formado no processo de hidratação do cimento, sendo este substituído por um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e outros produtos cristalinos, nomeadamente hidratos de aluminato de cálcio e hidratos de alumino-silicatos (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} e C_3AH_6).

A incorporação de metacaulino leva a um refinamento da estrutura de poros do betão, levando a uma porosidade e tamanho de poros menores e também a uma diminuição da permeabilidade.

Por outro lado, a incorporação de metacaulino de elevada reatividade (HRM) como substituto parcial do cimento entre 10 e 15% pode ser suficiente para controlar a expansão da degradação devido à reação alcalis-sílica no betão, uma das principais fontes de deterioração química do betão. (Siddique & Klaus, 2009)

A resistência dos betões aos ataques de sulfato é também influenciada positivamente pela incorporação de metacaulino na sua composição.

De acordo com estudos realizados por Siddique & Klaus (2009), a resistência à penetração de cloretos aumenta nos betões com adição de metacaulino. Resultados obtidos comprovam uma diminuição na difusão de iões cloretos relacionada com o aumento da percentagem de metacaulino utilizada, através do aumento do tempo de penetração ou pela diminuição do coeficiente de difusão como comprova a Tabela 1:

Tabela 1- Difusão de cloretos para argamassas com CEM I 42,5, metacaulino e caulino (Siddique & Klaus, 2009)

Material	Tempo de penetração (dias)	Coefficiente de difusão aparente ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)
CEM I – 42.5	13	1,29
5% MK	45	4,71
10% MK	82	3,31
15% MK	203	1,23
20% MK	Superior a 1 ano	-
10% Caulino	4	1,81

Para além de um aumento generalizado na durabilidade do betão, esta solução apresenta-se ainda como sendo mais sustentável visto que, com a substituição de parte do tradicional cimento utilizado como ligante, diminui-se também a poluição por este provocada, sendo por isso mais ecológico. Este é uma questão de elevada importância nos dias que correm dado que, com o aumento das preocupações ambientais, torna-se cada vez mais imperativa a utilização de soluções sustentáveis deste ponto de vista.

3. A AÇÃO DOS CLORETOS NO BETÃO

3.1. Fontes de cloretos

Ao longo da sua vida útil, as estruturas de betão podem ser sujeitas aos mais variados agentes agressivos e, naturalmente, este fator deve ser levado em linha de conta aquando da fase de dimensionamento das mesmas.

Segundo Costa & Appleton (1999), trata-se de um problema à escala mundial, que tem tido repercussões económicas muito gravesas.

A ação dos cloretos é uma das mais graves formas de degradação que podem ocorrer em estruturas de betão armado e a contaminação pode ocorrer essencialmente de duas formas: através da sua presença nos materiais constituintes do betão ou quando as estruturas se apresentam expostas a ambientes agressivos com presença de névoa salina. No caso dos materiais, os cloretos são regularmente adicionados ao betão na forma de adjuvantes para aceleração de presa e podem também estar presentes na água de amassadura ou nos agregados. Esta forma de contágio é facilmente identificada visto que a presença de cloretos é homogénea em toda a estrutura (Varela, 2010).

Por outro lado, quando ocorre uma exposição prolongada a ambiente agressivos, as estruturas entram em contacto com sais de degelo contendo cloretos que penetram no betão, degradando-o. Segundo L. d. F. L. d. C. Pereira (2001a), os cloretos com maior potencial de penetração encontram-se dissolvidos em água.

A atuação deste agente agressivo não degrada diretamente o betão mas, no caso deste se encontrar exposto à ação de cloretos, estes irão penetrar no betão através dos seus poros e, uma vez alcançada a armadura, desencadeia-se um processo de corrosão do aço que origina um aumento da secção dos varões que leva, em última análise, à abertura de fendas e fragmentação do betão, comprometendo a segurança e a durabilidade da estrutura.

3.2. Fatores que influenciam o ingresso de cloretos

O fenómeno da propagação de iões cloreto no betão é função de diversas variáveis tais como a maturidade do betão, o tempo de exposição, a temperatura, a razão água/cimento, o tipo de cimento, o tempo de cura e a concentração de sais. (Bioubakhsh, 2011)

Estudos apresentados por Bioubakhsh (2011) mostram que a difusão de cloretos não é afetada de forma significativa pela composição do cimento mas sim, pela razão água-cimento. Na Tabela 2 pode observar-se um aumento da difusão de iões cloreto, resultante do aumento da razão A-C.

Tabela 2: Coeficientes de difusão de cloretos para diferentes composições de betão (Bioubakhsh, 2011)

Classe do Betão	C3A	Al ₂ O ₃	C4AF	$D_c \times 10^{-12}$ com razão A-C de:			
				0.4	0.5	0.6	0.7
PC35	<1%	<3%	-	6.0	7.0	10.0	19.0
PC45	<1%	<3%	-	2.9	3.0	5.0	11.0
PC55	<1%	<3%	-	1.7	2.1	3.2	6.5
PC35	≈ 10%	-	≈ 7%	0.2	0.5	1.1	3.0
PC45	≈ 10%	-	≈ 7%	0.09	0.25	0.50	1.5
PC55	≈ 10%	-	≈ 7%	0.05	0.07	0.11	0.21

Segundo Bioubakhsh (2011), a temperatura tem um efeito complicado na difusão de cloretos. Por um lado, o seu aumento conduz a um grande incremento na difusão de iões cloreto, no entanto também faz com que melhore a capacidade de ligação entre os iões. Para além disso, a hidratação do betão e as reações pozolânicas são aceleradas quando na presença de elevadas temperaturas, tornando assim a estrutura porosa do betão mais densa.

O efeito de hidratação do betão e ligação dos iões cloreto também é melhorado com o tempo, podendo afirmar-se que a difusão de cloretos no betão diminui com a maturidade do mesmo.

Por outro lado, pode também afirmar-se que o tempo de cura do betão e as condições em que é realizada são fatores determinantes na difusão de cloretos. Betões curados ao ar livre e betão curados em água apresentam respetivamente, maior e menor condutividade de cloretos (Bioubakhsh, 2011). A cura do betão em ambiente húmido é essencial para que se consigam alcançar baixos níveis de condutividade de cloretos.

3.3. Mecanismos de transporte de cloretos

De acordo com Heirman & Vandewalle (2006), existem três mecanismos principais de transporte de iões cloreto (Cl⁻) no betão:

- Absorção por capilaridade;

- Permeabilidade;
- Difusão.

Destes três mecanismos, o mais corrente é a difusão de iões de cloreto. No entanto, se o recobrimento for insuficiente, a absorção capilar pode mesmo ser o mecanismo dominante. (Figueiredo, 2011)

Sendo a difusão o meio de transporte mais comum dos cloretos numa superfície de betão, este irá sempre ocorrer no caso de contacto. Quando se verificam diferenças de concentração de cloretos entre o betão e o meio em que se insere, desencadeia-se a transferência de massa na solução dos poros, da zona de maior concentração de cloretos para a zona de menor concentração. Este fenómeno é designado por difusão.

De acordo com Ferreira (2000), entende-se por capilaridade o transporte de líquidos nos poros de um material devido à tensão superficial existente nos capilares. A força capilar que provoca a absorção é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros.

Existe ainda um outro mecanismo de transporte de cloretos no betão, a migração, que, segundo Ferreira (2000), consiste no transporte de iões num eletrólito devido à ação de um campo elétrico que por sua vez, acelera drasticamente o processo de difusão dos iões cloreto.

3.3.1. Absorção por capilaridade

Entende-se por absorção capilar, o processo no qual o betão preenche e retém a água nos poros sólidos da sua estrutura, devido à tensão existente nos capilares.

A capacidade de absorção capilar é inversamente proporcional à dimensão dos poros do betão, ou seja, os poros de maior dimensão apresentam uma força capilar menor em relação aos poros de dimensão mais reduzida. No entanto, devido à maior pressão existente nos poros mais pequenos, a velocidade de absorção destes é mais elevada.

De acordo com Ferreira (2000), o transporte de líquidos resultante da absorção por capilaridade é influenciado por características de ambos os intervenientes no processo: o líquido e o sólido. As propriedades que influenciam o líquido são:

- Viscosidade [Ns/m^2];
- Densidade [kg/m^3];
- Tensão superficial [N/m].

Por outro lado, as propriedades do sólido que influenciam a sua capacidade de absorção por capilaridade são:

- Estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares);
- Energia superficial.

De acordo com V. G. Á. Pereira (2001b), citando Helene (1993), o processo de absorção por capilaridade pode ser modelado pela lei de Jurin, expressa pela equação (2), que relaciona a altura de ascensão capilar ao longo de tempo de contacto:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v \cdot r \cdot t}{\eta}} \quad (2)$$

Onde:

h : altura ou penetração de água no capilar [m];

v : tensão superficial da água $\approx 75 \times 10^{-4}$ [kg/m];

r : raio capilar [m];

η : viscosidade da água $\approx 13 \times 10^{-5}$ [kg.s/m²];

t : tempo [s].

A duração do processo de absorção por capilaridade é limitada uma vez que, atingida uma determinada profundidade de penetração do líquido, as forças capilares passam a ser insuficientes para o transporte, passando a difusão a ser o principal mecanismo atuante.

Trata-se de um processo importante no transporte de cloretos no betão, especificamente quando as estruturas se encontram sujeitas a ciclos de molhagem e secagem. Durante o ciclo de molhagem, a água contendo cloretos é absorvida pela superfície do betão e, após a secagem a água evapora, mantendo-se presente o sal nela transportado.

3.3.2. Permeabilidade

A permeabilidade pode ser definida como a facilidade com que um fluido escoar através de um sólido, sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (V. G. Á. Pereira, 2001b).

Este tipo de transporte está diretamente relacionado com a porosidade do material sendo, desta forma, um mecanismo indireto de medição desta propriedade no betão.

Existem diversos fatores que influenciam a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade do betão sendo os principais:

- O tipo de cimento utilizado no betão;
- A relação água/cimento;
- O grau de hidratação do cimento;
- O teor e tipo de adição;
- A presença de microfissuras ou fissuras no betão.

A permeabilidade de água no betão pode ser estimada através da utilização da lei de Darcy, para regime laminar, estacionário e não turbulento, de acordo com a expressão (3):

$$V = k \frac{H}{x} = \frac{Q}{S} \quad (3)$$

Onde:

V : velocidade de escoamento da água [m/s];

k : coeficiente de permeabilidade da água no betão [m/s];

H : gradiente de pressão da água [m.c.a.];

x : espessura do betão [m];

Q : caudal percolado [m³/s];

S : área da superfície onde percola a água [m²]

3.3.3. Difusão

A difusão de iões, gases ou vapores ocorre quando se verificam diferenças de concentração entre o betão e o meio que se encontra em contacto com este.

O processo de difusão é caracterizado através das leis de Fick, podendo estimar-se através destas o coeficiente de difusão, D .

A primeira Lei de Fick, exprime a difusão em estado estacionário, considerando um fluxo de iões constante no tempo e ao longo da secção e é representada pela expressão (4):

$$Q_s = D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

Onde:

Q_s : fluxo de iões [g/m²s];

D_{ef} : coeficiente de difusão efetivo [m²/s];

$\frac{\partial C}{\partial x}$: gradiente de concentração;

C : concentração de iões na solução [g/m³];

x : profundidade [m].

Visto a difusão de iões no betão não se tratar, de todo, de um processo que se desencadeia em regime estacionário, a situação acima referida não caracteriza da forma mais realista o fenómeno. Neste contexto, coloca-se em prática a segunda Lei de Fick (5), que caracteriza mais corretamente o processo de difusão, visto que considera um regime não estacionário, admitindo variações no fluxo de iões de acordo com a profundidade e o tempo decorrido.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

Segundo Ferreira (2000), definindo as condições de fronteira como sendo $c = c_0$, para $x = 0$ e $t > 0$, e a condição inicial como sendo $c = 0$ para $x > 0$ e $t = 0$, pode obter-se a equação (6), solução da expressão (5).

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad (6)$$

Onde erf é a função erro. O coeficiente de difusão, D , pode então ser determinado conhecendo-se, por processos laboratoriais, os valores dos teores em cloretos no momento inicial do ensaio e ao longo do tempo, t .

3.3.4. Migração

A migração é um processo artificial de transporte de iões com recurso a um campo elétrico. O processo natural de migração dos iões é acelerado com a aplicação de uma diferença de potencial que os obriga a mover-se no sentido oposto à carga dos eletrodos.

Genericamente afirma-se que o fluxo de iões através de um determinado meio é produto de três mecanismos de transporte, sendo estes a difusão, migração e convecção, como expresso na equação (7).

$$J = D \cdot \frac{dC}{dx} + \frac{ZF}{RT} \cdot DC \cdot \frac{dE}{dx} + CV_e \quad (7)$$

Onde:

- J : fluxo de massa [g/m^2];
- D : coeficiente de difusão [m^2/s];
- C : concentração [g/m^3];
- x : distância [m];
- Z : carga elétrica;
- F : constante de Faraday [$\text{J}/\text{V} \cdot \text{mol}$];
- R : constante dos gases [$\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$];
- T : temperatura absoluta [K];
- E : potencial elétrico [V];
- V_e : velocidade da solução [m/s].

Se, de acordo com Ferreira (2000), for desprezada a influência da convecção e, ao mesmo tempo, não for considerada a ação da difusão, devido ao elevado valor de voltagem aplicada, então o coeficiente de difusão pode ser calculado através da expressão (8):

$$D_{EFF} = \frac{J \cdot R \cdot T \cdot L}{Z \cdot F \cdot C \cdot Y \cdot \Delta E} \quad (8)$$

Onde:

- D_{EFF} : coeficiente de difusão efetivo;
- Y : coeficiente de atividade;
- L : espessura do provete de betão;
- J : fluxo de iões.

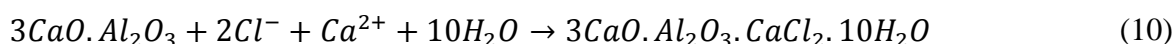
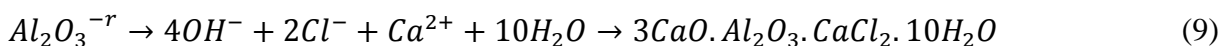
3.4. Sal de Friedel

Tal como referido em 2, a utilização de metacaulino, bem como outros materiais pozolânicos, pode afetar de forma positiva a resistência do betão à penetração e difusão de iões cloreto através da melhoria da sua microestrutura e da capacidade de fixação de cloretos.

De acordo com Figueiredo (2011), para misturas de cimento Portland comum, o principal mecanismo de fixação de cloretos é a formação de sal de Friedel e complexos devidos aos aluminatos.

O sal de Friedel (Fs) é um composto que resulta da reação química entre o aluminato tricálcico (C_3A), principal componente do cimento Portland, e os iões cloreto e a sua composição química é $3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$ e é função do teor da pozolana em alumina reativa e do teor do cimento em C_3A tendo este último uma influência bastante menor que o anterior.

De acordo com Abrantes (2011), citando Talero et al. (2011), o composto originado pela alumina reativa da pozolana é designado por FS de formação rápida ao passo que o originado pelo aluminato tricálcico é designado por Fs de formação lenta. As expressões (9) e (10) representam as reações correspondentes a cada um destes fenómenos, respetivamente.



A formação de sal de Friedel funciona como uma barreira de fixação que estabiliza os cloretos na camada superficial do betão, densificando ao mesmo tempo essa mesma camada.

Segundo Figueiredo (2011), estudos demonstram que as misturas contendo metacaulino têm uma maior capacidade de fixação de cloretos dissolvidos na água presentes nos poros devido à formação de sal de Friedel. O metacaulino contribui assim para a redução de cloretos e hidróxidos do betão, diminuindo o risco de corrosão.

4. ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Tal como foi referido anteriormente, a penetração de cloretos nas estruturas de betão perfila-se como uma das principais causas de degradação e perda de durabilidade das mesmas e, por esse motivo, torna-se imprescindível o melhor conhecimento possível sobre a atuação destes agentes agressivos e da sua interação com o betão.

Deste modo, têm, ao longo das últimas décadas, sido desenvolvidas várias formas de estudo, práticas e teóricas, para alcançar o fim desejado. Os ensaios laboratoriais ou “*in situ*” são formas de efetuar esse mesmo estudo.

De acordo com C. Andrade, Prieto, Tanner, Tavares & d’Andrea (2012), existem três tipos de ensaios de penetração de cloretos:

- Ensaios de difusão, nos quais os cloretos penetram no betão naturalmente por difusão, através de imersão ou “*ponding*”;
- Ensaios de migração, com uma duração bastante inferior, nos quais é aplicado um campo elétrico, com o auxílio de dois elétrodos, a uma superfície de betão;
- Ensaios de resistividade, nos quais não existe a necessidade de colocar o betão em contacto com a solução que contém cloretos.

Os ensaios podem também ser classificados de acordo com o regime em que são efetuados, estacionário ou não estacionário, ou seja, assumindo que as propriedades das amostras se mantêm inalteradas ou não ao longo da duração do ensaio.

De seguida, apresentam-se e descrevem-se os ensaios existentes, devidamente agrupados pela sua forma de atuação.

4.1. Ensaios de Difusão

4.1.1. Ensaio de Imersão (NT BUILD 443)

Este ensaio baseia-se, tal como o nome indica, na imersão de provetes de betão numa solução salina e, após um determinado tempo de exposição, na determinação do perfil de penetração dos cloretos no betão pelo método volumétrico ou colorimétrico ou por potenciometria, a várias profundidades. A técnica denominada de potenciometria consiste na introdução de um elétrodo formado por um “elemento sensor” que, quando mergulhado numa

solução iónica, fornece um potencial. Esse potencial, dependente da quantidade de iões livres na solução, é medido em relação a outro potencial constante de referência (eléctrodo de referência) através de um medidor analógico ou digital.

Nota: As amostras utilizadas para a realização do ensaio podem ser provenientes de betões moldados em laboratório ou de tarolos retirados por carotagem de zonas representativas de uma estrutura. As amostras devem ser cilíndricas e o seu diâmetro deve ser superior a três vezes a dimensão máxima do inerte e não inferior a 75 mm e o comprimento deve ser tal que permita a obtenção, por cada amostra, de dois provetes com comprimento de 100 mm. (LNEC, 1993c)

4.1.2. AASHTO T259 – “Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration”

Tal como o ensaio apresentado anteriormente, também este tem como objetivo a medição da penetração de cloretos sofrida pelo betão. De acordo com Stanish, Hooton & Thomas (1997) este ensaio consiste na colocação de uma solução com 3% de cloreto de sódio (NaCl) em contacto com três provetes de betão. Este contacto ocorre apenas na face superior dos provetes, estando as faces laterais tapadas e a face inferior sujeita ao ambiente de secagem como sugere a Figura 2. As dimensões aconselhadas são de 75 mm de espessura e uma superfície de contacto de 300 mm².

A duração do ensaio é de 90 dias e, após a sua conclusão, os provetes são retirados e cortados em camadas das quais são extraídas amostras representativas que, posteriormente, são analisadas para determinação do teor em cloretos por potenciometria, procedimento explicado detalhadamente em 5.4.6.

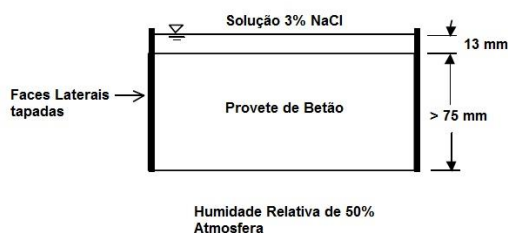


Figura 2- Representação da preparação do ensaio AASHTO T259

4.1.3. Método da célula de difusão

De acordo com Ferreira (2000), este é um dos métodos mais utilizados e baseia-se na utilização de células de difusão, que começaram a ser utilizadas por Page. (Page, Short, & El Tarras, 1981)

O ensaio consiste na utilização de uma célula de difusão em que a membrana entre os dois compartimentos da célula é constituída por um disco de betão, com uma espessura suficientemente pequena, mas representativa do material, na ordem dos 25 mm. (LNEC, 1993d)



Figura 3 – Ensaio da célula de difusão

Os dois compartimentos (A e B) da célula são preenchidos com soluções saturadas de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) com 3% de NaCl, e de Ca(OH)_2 simples, respetivamente.

Depois da montagem do ensaio procede-se, periodicamente, à remoção de 1 cm^3 de solução do compartimento B para análise de cloretos. (LNEC, 1993d)

A duração total do ensaio deverá estar compreendida entre os 30 e os 45 dias.

4.1.4. Penetração por Pressão

Esta técnica de avaliação da penetração de cloretos no betão é, em quase todos os aspetos, similar ao ensaio que é tradicionalmente realizado para aferir sobre a permeabilidade de um betão à água, utilizando uma célula de pressão.

Em linhas gerais, este ensaio consiste na exposição de uma face de uma determinada amostra de betão a uma solução contendo cloretos, sob pressão (Stanish et al., 1997).

Este procedimento conduz a uma penetração dos cloretos no betão por difusão. O esquema de realização do ensaio é apresentado na Figura 4.

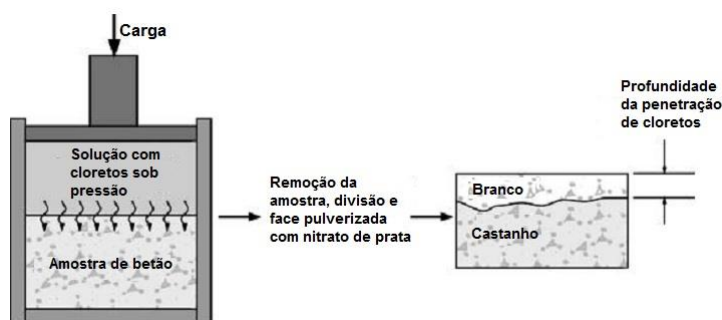


Figura 4 - Representação esquemática do ensaio de penetração por pressão (Stanish et al., 1997)

O perfil de penetração de cloretos é depois realizado com recurso à técnica colorimétrica apresentada em 5.4.5.

4.2. Ensaio de Migração

4.2.1. ASTM C1202 - “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”

O ensaio ASTM C1202, ou “Rapid Chloride Permeability Test” (RCPT) foi desenvolvido no âmbito de um programa de investigação da FHWA (Federal Highway Administration), sediada nos E.U.A., e tinha como principal objetivo o desenvolvimento de técnicas não-destrutivas e “*in situ*” de aferição da permeabilidade do betão aos cloretos. (Grace, 2006)

De acordo com Stanish et al. (1997), apesar do ensaio ser correntemente chamado de “Rapid Chloride Permeability Test”, esta designação não é muito precisa, uma vez que não se trata realmente de um ensaio de medição de permeabilidade, mas sim do movimento de iões.

Outro dos principais objetivos do desenvolvimento deste ensaio prendia-se com a necessidade de diminuir o tempo do ensaio visto que, mesmo com razões A-C relativamente elevadas, a velocidade de propagação de cloretos no betão é bastante baixa e, outros ensaios bastantes utilizadas à data, nomeadamente o AASHTO T259, levavam bastante tempo a ficar concluídos. (Grace, 2006)

A realização do ensaio consiste na preparação de uma amostra cilíndrica de betão com 50 mm de espessura e 100 mm de diâmetro que é colocada em contacto com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,3 M), de um lado, e outra solução com 3% de NaCl do outro, como sugere a Figura 5.

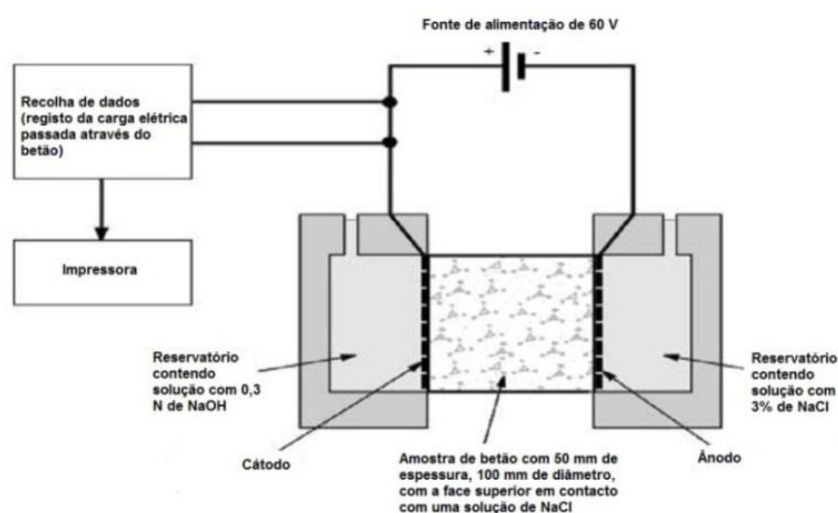


Figura 5 - Representação esquemática do ensaio ASTM C1202 (Stanish et al., 1997)

Após a montagem do ensaio, a amostra é sujeita a uma carga elétrica de 60 V durante 6 horas e, ao longo desse período são efetuadas leituras a cada 30 minutos. Com estas medições, calcula-se então a carga passada, com auxílio da equação (11), baseada na regra trapezoidal (ASTM Standard C1202-2012):

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (11)$$

Onde:

Q : carga passada através do betão [Coulombs];

I_t : corrente após t minutos da aplicação da voltagem [Amperes];

I_0 : corrente imediatamente após a aplicação da voltagem [Amperes].

Ainda de acordo com a Norma ASTM Standard C1202-International (2012), se se tratar de uma amostra de diâmetro diferente de 95 mm, deve efetuar-se um ajuste que consiste na multiplicação do valor estabelecido em (11) pela razão entre os diâmetros “*standard*” e real da amostra:

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (12)$$

A carga calculada que passa através do betão (Q_s) é então comparada com os valores apresentados na Tabela 3, e efetua-se uma estimativa da permeabilidade do betão aos cloretos.

Tabela 3: Permeabilidade a cloretos com base na carga passada no betão (Grace, 2006)

Carga Passada (Coulombs)	Permeabilidade a Cloretos	Exemplo
> 4000	Elevada	Razões A-C > 0,6
Entre 2000 e 4000	Moderada	Razões A-C entre 0,4 e 0,5
Entre 1000 e 2000	Baixa	Razões A-C < 0,4
Entre 100 e 1000	Muito Baixa	Betões com selantes
< 100	Desprezável	Betões com polímeros

4.2.2. Ensaio de Migração Rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test)

Anteriormente designado por NT Build 492, e hoje em dia também conhecido como RCM ou RMT, este ensaio em regime não estacionário foi inicialmente apresentado por Tang (1996) e é, atualmente, bastante utilizado no âmbito de investigações relativas à durabilidade do betão. Este ensaio é uma modificação do ensaio de migração tradicional no entanto, a diferença entre os dois é suficiente para que seja interessante e apropriado serem mencionados separadamente (Stanish et al., 1997).

O ensaio CTH consiste na indução de uma migração iónica potenciada pela aplicação de uma voltagem de 30 V durante um espaço de tempo determinado. A amostra é selada lateralmente e é colocada em contacto com uma solução catódica contendo 10% de NaCl na face inferior e uma outra solução anódica de NaOH 0,3 M colocada em contacto com a face superior. Com o auxílio da diferença de potencial, os iões irão migrar da solução de NaCl através do betão, até à solução com NaOH. Após a realização do ensaio, aplica-se a técnica colorimétrica apresentada em 5.4.5. e mede-se a penetração de cloretos na amostra. O esquema da realização do ensaio é apresentado na Figura 6.

Através desta técnica e com o auxílio de equações apresentadas e discutidas em 5.4.5., é calculado o coeficiente de difusão, D_{RCM} .

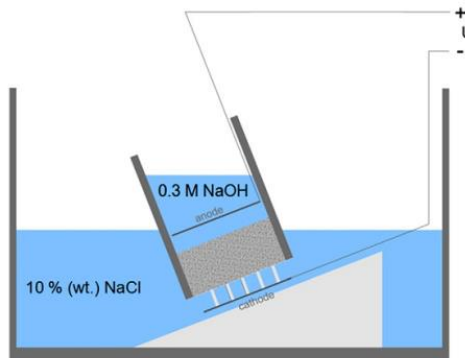


Figura 6 - Representação esquemática do ensaio CTH (Spiesz & Brouwers, 2012)

4.3. Ensaio de Resistividade

Entende-se por resistividade ou resistência elétrica de uma substância a capacidade de resistência da mesma à passagem de corrente elétrica. É função inversa da condutividade. Esta grandeza é expressa em ohm.m e é dada pela equação (13):

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (13)$$

Onde:

ρ : resistividade [$\Omega.m$];

R : resistência medida da amostra [Ω];

A : secção da amostra [mm^2];

L : comprimento da amostra [m].

Existem dois grandes conjuntos de ensaios, envolvendo corrente direta (CD) ou corrente alternada (CA) (Stanish et al., 1997). Estes podem também agrupados pela sua forma de realização, laboratorial ou “*in situ*”. De seguida procede-se à apresentação de um ensaio correspondente a cada situação.

4.3.1. Dois Eléttodos (Laboratorial)

Este tipo de ensaio laboratorial pode ser efetuado através da aplicação de uma voltagem entre dois eléctrodos separados por uma amostra de betão (Figura 7) e, de seguida é determinada a resistividade do betão. Devido ao facto de o betão ser um condutor de electricidade na forma de eletrólito, desenvolve-se uma polarização que, por sua vez, origina uma redução desconhecida na voltagem aplicada no ensaio (Stanish et al., 1997). Este problema pode ser contornado assumindo que este efeito da polarização é constante para diferentes voltagens e, pode ser tido em conta efetuando medições para duas voltagens distintas. A resistividade do betão é então calculada com recurso à equação (14):

$$R = \frac{E_{a1}I_2 - E_{a2}I_1}{I_1 - I_2} \quad (14)$$

Onde:

R : resistividade;

E_{a1} e E_{a2} : voltagens aplicadas;

I_1 e I_2 : correntes relevantes passadas na amostra.

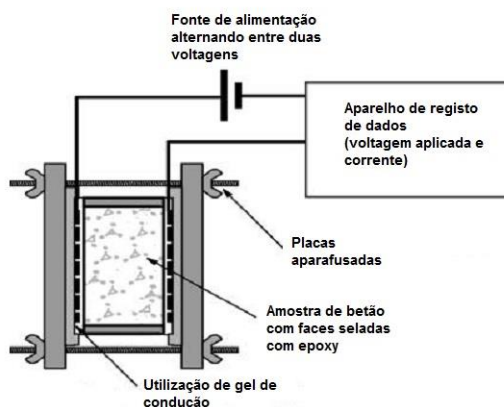


Figura 7 - Dispositivo para determinação de resistividade (Stanish et al., 1997)

4.3.2. Array de Wenner (*“in situ”*)

Outra das formas de determinar a resistividade do betão, neste caso realizada *“in situ”* é através de uma técnica denominada de array de Wenner. Este ensaio consiste na colocação de quatro eléctrodos espaçados uniformemente numa superfície de betão. Os dois eléctrodos

colocados no exterior aplicam a corrente, ficando os dois interiores encarregues de fazer a medição do potencial (Figura 8).

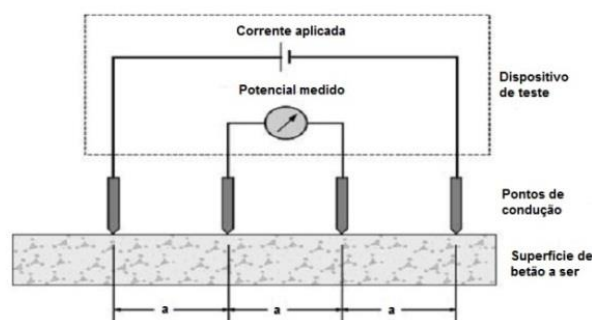


Figura 8 - Esquema do Ensaio de Array de Wenner (Stanish et al., 1997)

Após a realização do ensaio, pode então ser calculada a resistividade do betão ensaiado através da equação (15):

$$\rho = 2\pi a \frac{P}{I} \quad (15)$$

Onde:

ρ : resistividade do betão;

a : distância entre os pontos de contacto;

P : potencial medido;

I : intensidade da corrente aplicada.

4.4. Considerações Adicionais

O desenvolvimento de uma vasta gama de ensaios de determinação da penetração de cloretos no betão tem permitido, ao longo dos tempos, que as necessidades específicas de cada investigador possam ser cada vez mais satisfeitas. Cada um dos ensaios anteriormente descritos apresenta vantagens e desvantagens na sua utilização e, dessa forma, a escolha pela realização de qualquer um dos mesmos, deve ser devidamente estudada e fundamentada.

Os ensaios de difusão apresentam claramente a grande desvantagem de serem processos de longa duração, impedindo assim a sua possível utilização, por exemplo, para controlo de qualidade durante uma obra em curso (Stanish et al., 1997). Por outro lado, os ensaios de migração resolvem a questão da elevada duração dos anteriores mas, a utilização de aceleradores de migração com recurso a corrente elétrica, leva a um aumento da temperatura

da amostra de betão, podendo aumentar a difusão de cloretos, adulterando assim os resultados alcançados.

Os ensaios realizados por determinação da resistividade do material apresentam também a vantagem da reduzida duração, bem como o facto de as técnicas utilizadas serem bastantes familiares à maioria dos investigadores e também pelo facto de, ao contrário dos ensaios de migração, não ocorrer um aumento da temperatura, evitando desta forma o problema referido anteriormente (Stanish et al., 1997). Por outro lado, a determinação da resistividade do betão pode apresentar algumas desvantagens. Em primeiro lugar, a determinação da condutividade da solução presente na amostra é bastante complicada devido ao facto de ser extremamente difícil atingir regimes estacionários, obrigando assim a uma análise mais complexa da condutividade. Se a opção passar pela pré-saturação da amostra com uma solução de condutividade conhecida, a mesma deve ser previamente sujeita a um processo de secagem de modo a evitar a diluição da solução introduzida. A secagem da amostra pode trazer consequências para os resultados finais obtidos uma vez que pode originar danos na sua estrutura porosa, levando à formação de microfissuras, fazendo assim aumentar a difusão. (Stanish et al., 1997)

Na Tabela 4 apresenta-se um quadro-resumo contendo os principais ensaios de determinação de cloretos no betão, bem como características inerentes a cada um dos mesmos.

Tabela 4: Quadro-resumo dos métodos de determinação de penetração de cloretos no betão

	Designação	Parâmetro Calculado	Técnica Utilizada	Temperatura	Duração Aproximada	Designação Alternativa
Longa Duração	NT Build 443	D_{NS}	Imersão	Constante	90 dias	Ensaio de Imersão
	AASHTO T259	D_{NS}	“Ponding”	Constante	90 dias	-
	Célula de Difusão	D_S	Célula de Difusão	Constante	30-45 dias	-
Curta Duração	ASTM C1202	Q	Célula de Migração	Variável	6 horas	AASHTO T277
	CTH	D_{NS}	Célula de Migração	Constante	(Dependente da corrente)	NT Build 492
	Resistividade	-	Medição de Resistividade	Constante	30 minutos	-
	Penetração por Pressão	K	Célula de Permeabilidade	Constante	(Dependente da pressão)	-

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados todos os materiais utilizados na formulação do betão, bem como as técnicas utilizadas na realização do mesmo.

5.2. Materiais

5.2.1. Cimento

O cimento utilizado na formulação dos betões é produzido pela empresa Cimpor e é do tipo CEM II/B-L 32,5N. De seguida, apresentam-se as Tabelas 5,6 e 7 com as principais características físicas e químicas do material, conforme indicação do produtor.

Tabela 5 – Propriedades químicas do cimento

Ensaio	Símbolo Químico	%
Óxido de Silício	SiO ₂	14,78
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	3,83
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,33
Óxido de Cálcio Total	CaO	59,55
Óxido de Magnésio	MgO	1,84
Teor de Sulfatos	SO ₃	3,04
Teor de Cloretos	Cl ⁻	0,03
Cal Livre	-	1,27
Perda ao Fogo	-	1,89
Resíduo Insolúvel	-	13,26

Tabela 6 – Propriedades físicas do cimento

Propriedade	Valor
Massa Volúmica (g/cm ³)	2,98
Superfície específica de Blaine (cm ² /g)	4603
Granulometria 90 µm	1,4
Água de Pasta (%)	26,1

Início de Presa ≥ 75 (min)	170
Fim de Presa (min)	222
Expansibilidade ≤ 10 (mm)	1,3

Tabela 7 – Resistências mecânicas do cimento

Resistências	MPa
Compressão aos 2 dias	22,4
Compressão aos 7 dias	33,6
Compressão aos 28 dias	40,0

5.2.2. Agregados

Para a realização do betão, foram utilizadas dois tipos de britas, de dimensões diferentes, e duas areias, grossa e fina.

Apresentam-se de seguida (Figuras 9, 10, 11 e 12) as curvas granulométricas relativas aos agregados, do mais grosso para o mais fino.

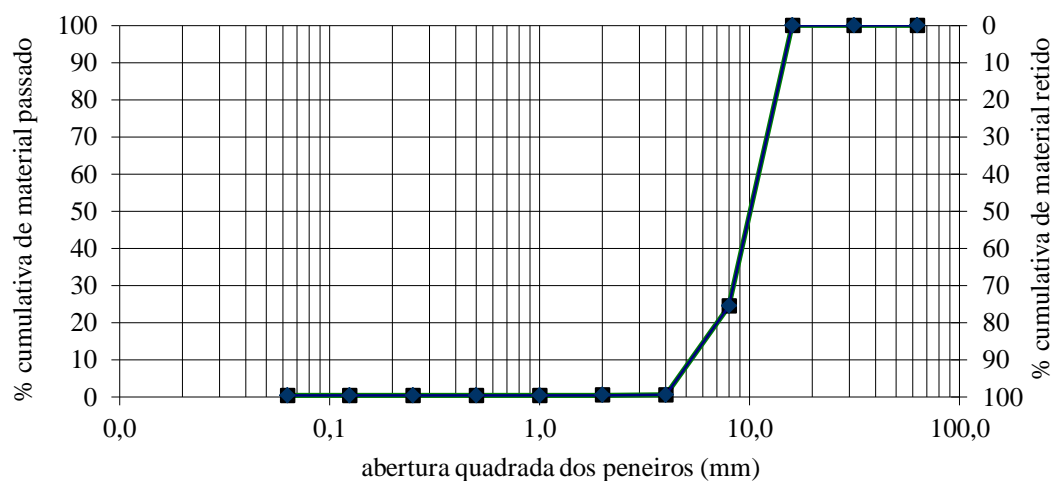


Figura 9 – Curva de distribuição granulométrica da brita 8/12

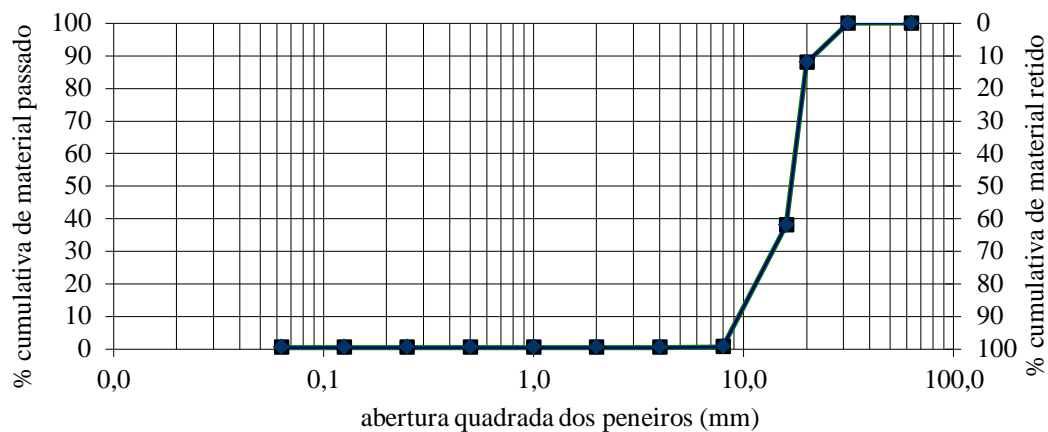


Figura 10 – Curva de distribuição granulométrica da brita 12/25

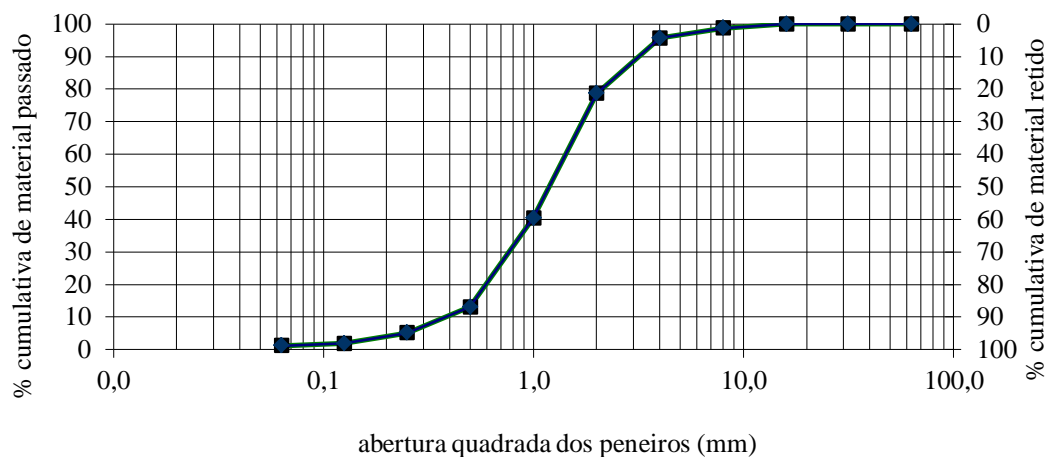


Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica da areia grossa

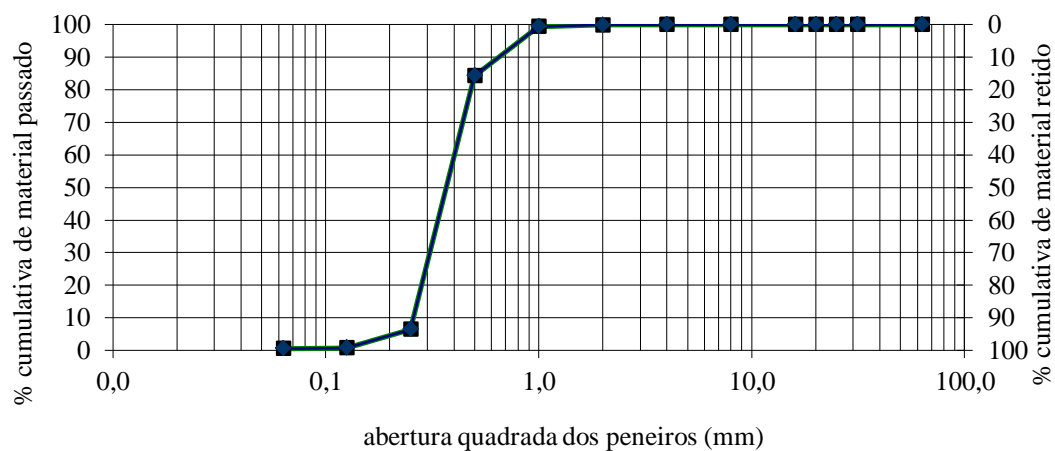


Figura 12 - Curva de distribuição granulométrica da areia fina

5.2.3. Metacaulino

O metacaulino utilizado é da empresa AGS-Mineraux e tem a denominação de Argical-M1000 e é utilizado como aditivo para betões, argamassas e revestimentos à base de cimento Portland e cal. As Tabelas 8 e 9 apresentam as principais características físicas e químicas deste material, segundo especificações fornecidas pelo produtor.

Tabela 8 - Propriedades químicas do Argical-M1000

SiO ₂	55%
Al ₂ O ₃	40%
K ₂ O+Na ₂ O	0,8%
Fe ₂ O ₃	1,4%
TiO ₂	1,5%
CaO+MgO	0,3%

Tabela 9 - Propriedades físicas do Argical-M1000

pH	6
Índice pozolânico (Teste Chapelle)	1100 mg Ca(OH) ₂ / g
Área específica	17 m ² / g
Massa específica	2,4 g / cm ³
Necessidade de água	900 g / kg
Densidade Aparente	
Não Embalado	400 kg / m ³
Embalado	800 kg / m ³

5.2.4. Superplastificante

O adjuvante utilizado na mistura do betão trata-se de um superplastificante da marca Sika denominado por Sikament® 400 Plus e tem como principais características o aumento da resistência mecânica do betão quando comparado com outros plastificantes tradicionais, o aumento da coesão do betão, melhoria da impermeabilidade e isenção de cloretos. No entanto, a característica mais interessante no trabalho realizado trata-se da redução de água de amassadura. Apresentam-se de seguida (Tabela 10) as principais características do superplastificante, segundo indicações do fabricante.

Tabela 10 - Propriedades do Sikament® 400 Plus

Base química	Mistura de polímeros orgânicos e aditivos
Massa volúmica	$1,24 \pm 0,03 \text{ kg / dm}^3$
pH	$10,5 \pm 1,0$
Teor de sólidos	$43,0 \pm 2,0 \%$
Teor em cloretos	$\leq 0,1\%$

5.3. Formulação do Betão

Para a determinação da formulação do betão a utilizar recorreu-se ao método de Faury, utilizando as curvas granulométricas, como demonstra a Figura 13.

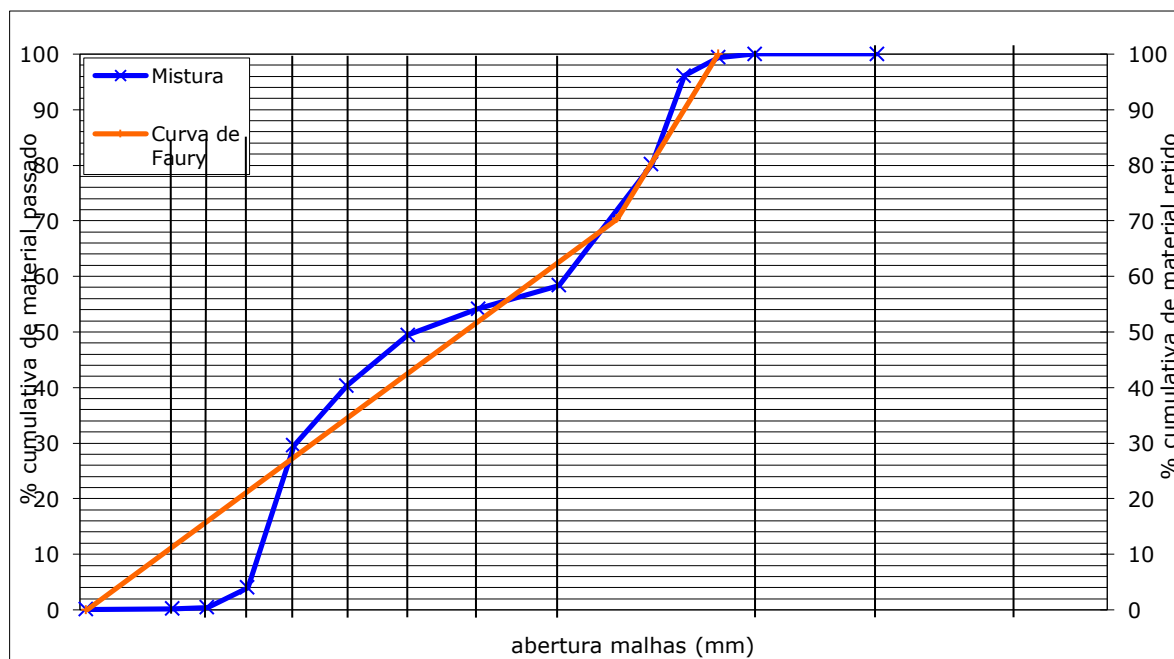


Figura 13 – Curvas granulométricas dos componentes do betão

Depois de realizadas as curvas granulométricas, obteve-se uma composição base para o betão a realizar, com as percentagens relativas a cada material apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Composição base do betão

Cimento	11,4 %
Brita 12/25	32,0 %
Brita 8/12	22,0 %
Areia Grossa	20,0 %
Areia Fina	14,6 %

Obtida a composição base do betão, passou-se para a fase da otimização para cada uma das variações a realizar. Com o objetivo de estudar a influência do metacaulino na proteção do betão à penetração e degradação por ação de cloretos, optou-se por realizar três composições: uma de referência, sem adição de metacaulino (Composição 1), outra substituindo 10% do cimento, em massa, por metacaulino (Composição 2), e uma terceira em que a percentagem substituída foi de 20% (Composição 3). Pretendendo comparar-se a resposta entre todas as composições, tornou-se imperativo que o menor número de fatores variassem para que os resultados finais fossem o mais fidedignos possível e não se corresse o risco de obtenção de resultados adulterados. Posto isto, deveria ser adotada uma razão água-cimento igual para todas as composições tentando, ao mesmo tempo, que todas as composições se inserissem na mesma classe de abaixamento, no ensaio de “*slump*”, variando apenas a percentagem de superplastificante utilizado. Devido ao facto de o metacaulino ser um material bastante absorvente, começou por ser testada a Composição 3 por ser a mais desfavorável e a partir do resultado obtido na mesma, formular as restantes composições. Inicialmente a razão água-cimento utilizada foi de 0,5 mas, devido à condicionante acima referida e ao facto de, por recomendação do fabricante, se estar limitado a 1% de superplastificante em relação ao cimento, a composição obtida era muito pouco trabalhável. Posto isto, foi necessário aumentar a razão água-cimento para 0,6. Desta vez, e com a adição do superplastificante, concluiu-se que a mistura se desintegrava e o ensaio de “*slump*” não era satisfatório. Optou-se então por verificar qual a razão A-C ideal para a Composição 1 e, a partir dessa, trabalhar com a percentagem de superplastificante até se obterem composições satisfatórias em todas as condições. Concluiu-se então que a razão água-cimento ideal era de 0,58 e desta forma, formularam-se todas as composições, variando a percentagem de superplastificante, como mostra a Tabela 12:

Tabela 12 – Razão A/C e percentagem de superplastificante das composições de betão

Composição	Designação	Razão Água-Ligante	Percentagem de Superplastificante
Referência	C1	0,58	0,2 %
10% Metacaulino	C2	0,58	0,6 %
20% Metacaulino	C3	0,58	1,0 %

5.3.1. Produção, consistência e cura

O betão foi produzido com recurso a uma betoneira com capacidade máxima de 120 litros. A colocação dos materiais foi efetuado por ordem, começando-se pelo agregado mais grosso até ao mais fino. De seguida, colocou-se o cimento, o metacaulino e por fim a água. No final de tudo, juntou-se o superplastificante. A mistura foi efetuada durante aproximadamente 4 minutos.

Finalizadas as misturas, procedeu-se ao ensaio de abaixamento, cujos resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do ensaio de abaixamento do betão

Composição	C1	C2	C3
Abaixamento (mm)	115 (S3)	120 (S3)	115 (S3)

Tal como se pode observar pela Tabela 13, todas as composições se enquadram na classe de abaixamento S3, visto ser a classe recomendada pela norma NP EN 206-1 para todos os betões, à exceção de betões de alta resistência.



Figura 14 – Equipamento utilizado na mistura do betão



Figura 15 – Ensaio de abaixamento do betão

Por fim, procedeu-se à colocação do betão em moldes (Figura 16), de acordo com as necessidades para cada ensaio, que se encontram descriminadas na Tabela 14. Os provetes foram deixados durante 72 horas ao ar livre e de seguida colocados em cura durante 28 dias numa câmara climática a 20°C e 95% de humidade relativa.



Figura 16 – Provete de betão fresco

Tabela 14 – Descrição da dimensão e número de provetes utilizados para os ensaios

Ensaio	Dimensão dos provetes (cm ³)	Número de provetes utilizados no ensaio
Resistência à compressão	10 x 10 x 10	3
Velocidade de propagação por ultra-sons	10 x 10 x 10	3
Densidade real e aparente	10 x 10 x 10	3
Absorção de água por capilaridade	Ø15 x 30	2
Absorção de água por imersão	10 x 10 x 10	3
Ensaio CTH	Ø10 x 5	3
Ensaio célula de difusão	Ø15 x 2,5	3
Ensaio de imersão	Ø10 x 10	3

5.4. Ensaio realizados

5.4.1. Densidade aparente e densidade real

De forma a caracterizar da melhor forma os betões utilizados, realizaram-se dois ensaios que consistiram na determinação da densidade aparente de cada composição e a respetiva densidade real pelo ensaio de Arquimedes, especificado na norma portuguesa NP EN 12390-7, aos 90 dias de cura.

O cálculo da densidade aparente é feito de forma simples através da determinação do peso dos provetes e posterior divisão do resultado pelo volume dos mesmos, de acordo com a equação (16).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (16)$$

Onde:

ρ : densidade aparente do provete [kg/m^3];

M : massa do provete seco [kg];

V : volume do provete [m^3].

Em relação ao cálculo da densidade real, também referenciada como massa volúmica, o procedimento passa pela saturação dos provetes a ensaiar e determinação da sua massa. Posteriormente, procede-se à determinação da massa dos provetes imersos em água, como demonstra a Figura 17.



Figura 17 – Ensaio de Arquimedes

De seguida, com recurso à equação (17), calcula-se o volume do provete e por fim, com o volume calculado, determina-se a densidade real da amostra, através da expressão (16).

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (17)$$

Neste ensaio são utilizadas três amostras e a média das mesmas corresponde ao resultado adotado.

5.4.2. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão dos provetes foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3, aos 28, 60 e 90 dias de cura, com o auxílio da prensa uniaxial da marca FORM+TEST (Figura 18). Utilizaram-se provetes cúbicos com 10 cm de aresta moldados de acordo com a norma NP EN 12390-2.



Figura 18 – Prensa utilizada para o ensaio de resistência à compressão



Figura 19 – Provette após ensaio de resistência à compressão

Para além da resistência à compressão dos provetes, deve também ser observado o modo de rotura. De acordo com a norma portuguesa NP EN-12390-3, apresentam-se, nas Figuras 20 e 21, os modos de rotura considerados satisfatórios e não satisfatórios para os provetes de betão.



Figura 20 – Modos de rotura satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN-12390-3

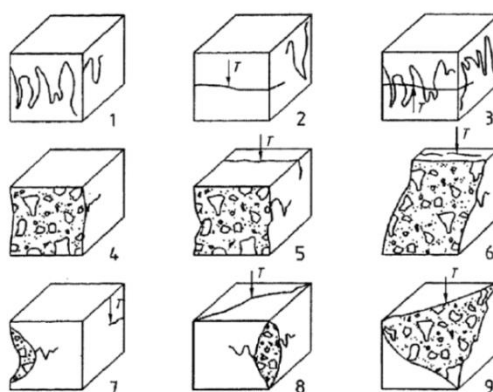


Figura 21 - Modos de rotura não satisfatórios para provetes cúbicos de acordo com a norma portuguesa NP EN-12390-3

Para cada uma das composições foram testados três provetes e a resistência à compressão de cada composição resulta da média entre os três resultados.

5.4.3. Ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons

A utilização da medição da velocidade de ondas ultrassónicas como forma de testar materiais foi originalmente desenvolvido para avaliar as qualidades do betão e os instrumentos CNS Farnell PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester) têm sido os mais utilizados para este propósito.



Figura 22 – Aparelho de medição da velocidade de propagação por ultra-sons

O ensaio consiste na colocação de dois transdutores em faces opostas do provete a ensaiar e, com o auxílio do equipamento, medir o tempo que uma onda demora a percorrer a distância entre os dois transdutores. Antes de se iniciar o ensaio, o aparelho deve ser calibrado com a ajuda de uma barra de calibração com o tempo de propagação conhecido que se deve fazer coincidir com a leitura obtida no aparelho, no caso 26 μ s. Existem três formas de colocação dos transdutores (Figura 23) porém, a transmissão direta apresenta-se como a melhor e mais eficaz solução uma vez que a máxima energia de impulso é transmitida segundo a direção normal ao transdutor emissor e daí a distância do percurso poder ser medida com maior precisão (Abrantes, 2011).

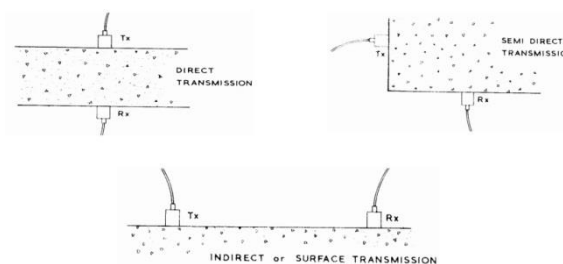


Figura 23 – Tipos de leitura da velocidade de propagação de ultra-sons

Após a determinação do tempo de propagação das ondas através do betão, utiliza-se a equação (18) para o cálculo da velocidade de propagação.

$$V = \frac{L}{t} \quad (18)$$

Onde:

V : velocidade de propagação das ondas [km/s];

L : comprimento do percurso (aresta do provete) [mm];

t : tempo de propagação de onda registado no dispositivo [μ s].

De seguida, e com os valores de velocidade de propagação, existem duas formas para estimar os módulos de elasticidade dinâmicos de cada betão: por iterações, com auxílio da Tabela 15, retirado do manual técnico do ensaio (Farnell, 2004) ou, como se procedeu, utilizando a equação (19). De referir ainda que, para cada composição foram ensaiados três provetes e os resultados finais para cada um dos betões resultam da média dos resultados obtidos.

$$E_d = \gamma \cdot v^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (19)$$

Onde:

E_d : módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

γ : densidade real do betão [kg/m^3];

ν : rácio dinâmico de Poisson = 0,2.

Tabela 15 – Relação entre a velocidade de onda ultrassónica e o módulo de elasticidade (Farnell, 2004)

Velocidade da onda ultrassónica [km/s]	Módulo de Elasticidade	
	Dinâmico [GPa]	Estático [GPa]
3,6	24	13
3,8	26	15
4,0	29	18
4,2	32	22
4,4	36	27
4,6	42	34
4,8	49	43
5,0	58	52

5.4.4. Absorção de água

➤ Imersão

De acordo com a especificação E394 do LNEC (1993b), entende-se por absorção de água por imersão a diferença entre a massa de um provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco, expressa em termos de volume do mesmo.

Para a realização do procedimento foram utilizados provetes idênticos aos usados para os ensaios de densidade, propagação por ultra-sons e compressão, sendo cúbicos com 10 cm de aresta.

O ensaio de determinação da absorção de água por imersão passa, inicialmente, pela saturação de provetes de betão até se atingir uma massa constante e, de seguida, efetua-se o registo dos valores obtidos, m_1 . De seguida, efetua-se a pesagem dos mesmos provetes em suspensão em água, realizando o mesmo procedimento referido em 5.4.1. e como demonstrado na Figura 17, registando também os valores obtidos, m_2 . Por fim, os provetes são colocados numa estufa até estarem totalmente secos e, depois de retirados, são registados os valores de massa dos provetes secos, m_3 . Os valores de absorção de água por imersão são calculados através da expressão (20), de acordo com a especificação E394 do LNEC (1993b):

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

A_i : absorção de água por imersão [%];

m_1 : massa do provete saturado ao ar [g];

m_2 : massa hidrostática do provete saturado [g];

m_3 : massa do provete seco [g].

Para a realização deste ensaio foram utilizados três provetes para cada uma das composições.

➤ Capilaridade

A norma E393 do LNEC (1993a), especifica um ensaio que permite quantificar a capacidade do betão absorver água por capilaridade. De acordo com a mesma, a absorção de água por capilaridade é a diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das faces em contacto com água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água. Esta característica pode também ser aferida pela altura média da ascensão capilar medida perpendicularmente à face do provete que se encontra em contacto com a água.

O ensaio é iniciado com a colocação dos provetes numa estufa a 40 °C durante 14 dias e, depois de estarem totalmente secos, são retirados e pesados, sendo registada a massa, M_0 .

De seguida, os provetes são colocados num tabuleiro, previamente equipado com suportes destinados a manter a face inferior dos mesmos em contacto com a água, como demonstra a Figura 24. Após este procedimento, enche-se cuidadosamente o tabuleiro com água até uma altura de aproximadamente 5 ± 1 mm acima da base dos provetes. Por fim, efetuam-se pesagens dos provetes e medem-se as respetivas alturas da água absorvida por capilaridade para os tempos de 3, 6, 24 e 72 horas.



Figura 24 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

A capacidade de absorção dos betões por capilaridade para cada tempo t_i é calculada dividindo o aumento de massa pela área da face inferior do provete, A_b , de acordo com a expressão (21).

$$\frac{M_i - M_0}{A_b} \quad (21)$$

Onde:

M_i : massa do provete para tempo de exposição t_i [g];

M_0 : massa inicial do provete seco [g];

A_b : área da base do provete [cm²].

Foram utilizadas duas amostras de cada composição para a realização deste ensaio.

5.4.5. Ensaio de migração rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test)

Um dos métodos utilizados para a determinação da penetração de cloretos no betão foi o ensaio CTH Rapid Chloride Migration Test. Este ensaio difere dos restantes por se tratar, tal como o nome indica, de um ensaio rápido e que permite, num curto espaço de tempo, aferir sobre a capacidade de resistência de um determinado material à penetração de cloretos.

O ensaio, sucintamente descrito em 4.2.2., baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial a um provete de betão de modo a que ocorra uma migração de iões cloreto através do mesmo.

O equipamento utilizado no ensaio foi desenvolvido e construído no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, de acordo com a especificação E463-2004 do LNEC (2004). Trata-se de uma caixa de plástico com uma estrutura em PVC construída no interior que permite, como aconselha a especificação, manter o provete com uma inclinação de 30 graus (Figura 26) durante a realização do ensaio.

Inicialmente, procedeu-se à preparação das amostras, cortando três provetes com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. De seguida realizou-se o pré-condicionamento das amostras, que consistiu na colocação das mesmas numa câmara de vácuo (Figura 25) durante três horas e, de seguida, na sua colocação numa solução saturada de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) durante (18 ± 2) horas. Ao fim do período de saturação retiraram-se as amostras e secaram-se superficialmente.

Após o pré-condicionamento passou-se para a fase do ensaio que consistiu, em primeiro lugar, na impermeabilização da face lateral do provete, com recurso a uma manga de borracha e, de seguida, na sua colocação no interior de um tubo de borracha que depois foi colocado na caixa de ensaio. Antes da colocação do provete, foram preparadas as soluções catódica e anódica, que foram colocadas em contacto com o betão para que ocorresse a migração dos iões cloreto. A solução catódica, colocada em contacto com a face inferior do betão é uma solução de 10% em massa de NaCl (100g de NaCl e 900g de água por litro) e a solução anódica, colocada dentro do tubo plástico, diretamente em contacto com a face superior da amostra consiste numa solução de NaOH 0,3 M em água destilada (12g de NaOH em cada litro de água).



Figura 25 – Preparação da amostra em câmara de vácuo



Figura 26 – Ensaio de migração de cloretos (CTH)

Finalizada a preparação do ensaio, procede-se à definição das condições e da duração do mesmo. Liga-se a fonte de alimentação com uma voltagem de 30V e regista-se a intensidade de corrente que passa pelo provete. Com o valor registado e com auxílio da Tabela 16 ajusta-se, se necessário, a voltagem a aplicar, regista-se novamente a intensidade de corrente e determina-se a duração do ensaio.

Tabela 16 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração (LNEC, 2004)

Corrente inicial I_{30V} (com 30 V) (mA)	Diferença de potencial aplicada U (após o ajuste) (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 \leq 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 \leq 30$	24

$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 \leq 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 \leq 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 \leq 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 \leq 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 \leq 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 \leq 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 \leq 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 \leq 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Após a realização do ensaio, desligou-se a fonte de energia, desmontou-se o esquema e retirou-se a amostra. Depois de secar superficialmente o provete, seccionou-se axialmente o mesmo com recurso a um martelo e um cinzel e aplicou-se o método colorimétrico para determinar a penetração de cloretos no provete, como demonstra a Figura 27.

O método consiste aplicação de uma solução de nitrato de prata na amostra e na análise da reação química provocada. Na presença de cloretos, estes irão ligar-se à prata e originar cloreto de prata, uma substância esbranquiçada. Por outro lado, na sua ausência, a prata liga-se a hidróxidos presentes no betão, originando uma substância de cor acastanhada (Stanish et al., 1997).



Figura 27 – Pormenor da penetração de cloretos no betão



Figura 28 - Medição da penetração de cloretos

Depois de deixar os iões cloreto reagir totalmente com o nitrato de prata (cerca de 15 minutos), procedeu-se à medição das profundidades de penetração em vários pontos com apoio de uma craveira digital (Figura 28) e, com o apoio das equações (22), (23) e (24), procedeu-se ao cálculo do coeficiente de difusão, D_{RCM} .

$$D_{RCM} = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (22)$$

Sendo:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (23)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (24)$$

Onde:

D : coeficiente de difusão em regime não estacionário [m^2/s];

z : valor absoluto da valência do ião (para cloretos, $z = 1$);

U : valor absoluto da voltagem aplicada [V];

F : constante de Faraday, $F = 9,648 \times 10^4$ [J/(V.mol)];

R : constante dos gases perfeitos, $R = 8,314$ [J/(K.mol)];

T : valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica [graus Kelvin];

L : espessura do provete [m];

x_d : valor médio da profundidade de penetração [m];

t : duração do ensaio [s];

erf^{-1} : inverso da função erro;

c_d : concentração de cloretos para a qual ocorre a mudança de cor, $c_d \approx 0,07N$ para betão com cimento CEM I e c_0 é a concentração de cloretos na solução catódica – $c_0 \approx 2N$.

Tendo em conta que $\text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \times 0,07}{2} \right) = 1,28$, pode simplificar-se a equação (25) utilizando:

$$D = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (25)$$

Este ensaio foi realizado em três amostras de cada composição para as idades de 28 dias, como sugerido pela norma E463-2004 do LNEC (2004), e ainda aos 90 dias, de forma a aferir sobre a evolução da capacidade de resistência dos betões à penetração de cloretos com o aumento do tempo de cura.

5.4.6. Método da célula de difusão

Outro dos ensaios que permitem a determinação da resistência à difusão de cloretos em betões trata-se do ensaio de longa duração com auxílio de células de difusão.

Tal como descrito em 4.1.3., este ensaio consistiu na montagem de uma célula de difusão contendo dois compartimentos (A e B) separados por um disco de betão com 25 mm de espessura. Após a obtenção dos discos com a espessura desejada, introduziram-se os mesmos em imersão total numa solução saturada de hidróxido de cálcio até à sua total saturação. Depois de totalmente saturadas, as amostras foram retiradas e após a sua secagem superficial com papel de filtro, procedeu-se ao isolamento da superfície cilíndrica, com recurso a tinta epoxídica. Após a secagem da tinta, passou-se à fase da montagem do ensaio utilizando silicone para unir o disco de betão e os compartimentos. Esta fase é de extrema importância pois é absolutamente fulcral que o sistema fique estanque de modo que a difusão dos cloretos se dê apenas através da superfície plana do disco de betão, de uma solução para a outra. Após a secagem do silicone, procedeu-se ao enchimento dos compartimentos A e B com soluções de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) com 3% de NaCl, e de Ca(OH)_2 simples, respetivamente, como sugere a Figura 29.

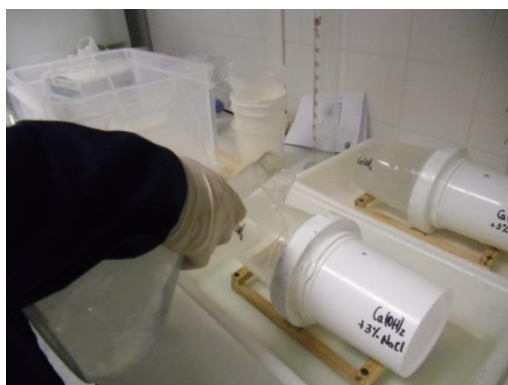


Figura 29 – Montagem do ensaio da célula de difusão



Figura 30 – Ensaio da célula de difusão

Depois de todo o equipamento estar montado e operacional, o próximo passo passou pela recolha periódica de amostras do compartimento B para análise de cloretos. De acordo com a norma E383 do LNEC (1993d), a periodicidade de recolha deverá ser uma vez por dia durante a primeira semana de ensaio, e duas vezes por semana nas semanas seguintes até ao final, que deverá ocorrer 45 dias após o início do ensaio.

Após a recolha das amostras, estas foram analisadas e foi determinado o teor de cloretos por potenciometria. Embora a norma E383 sugira que a quantidade de amostra recolhida seja

de 1 cm³, por questões práticas optou por se realizar recolhas de 20 cm³, quantidade que o equipamento existente e utilizado tem a capacidade de analisar.

O equipamento utilizado para análise de amostras por potenciometria trata-se de um analisador multi-parâmetros da marca CONSORT e modelo C860 com capacidade de determinação de parâmetros como pH, mV, condutividade, TDS e temperatura (Figura 31). O processo iniciou-se com a adição 2 ml de ISA (*Ionic Strength Adjustor*) às amostras retiradas das células de difusão e, de seguida, procedeu-se à medição da tensão, em mV, posteriormente transformada em concentração de iões cloreto. Para confirmar que não existiam interferentes, procedeu-se por fim à realização do ensaio de adição de padrão.



Figura 31 – Analisador multi-parâmetros para determinação de teor em cloretos

Depois de determinado o teor de cloretos, calcula-se o coeficiente de difusão aparente através da aplicação da equação (26):

$$D = \frac{vL}{C_A S} \cdot \frac{\Delta C_B}{\Delta t} \quad (26)$$

Onde:

D : coeficiente de difusão aparente [m²/s];

v : volume da solução no compartimento A [cm³];

L : espessura do disco de betão [cm];

S : área da superfície do disco exposta [cm²];

C_A : teor em cloretos no compartimento A;

C_B : teor em cloretos no compartimento B;

t : tempo de exposição;

$\frac{\Delta C_B}{\Delta t}$: coeficiente angular da reta correspondente à representação de $C_B = f(t)$.

No desenvolvimento deste ensaio, foram utilizadas duas amostras para cada composição.

5.4.7. Ensaio de imersão

O último realizado e também o de maior duração foi o ensaio de imersão especificado na norma E390 do LNEC (1993c) que estabelece um procedimento para determinação de parâmetros relativos à penetração de cloretos no betão endurecido, com base na medição do perfil de penetração de cloretos em amostras após imersão em solução com cloretos.

O ensaio inicia-se com a preparação dos provetes a utilizar obtendo-se, após o corte, amostras com 100 mm de diâmetro e comprimento. De seguida, colocam-se as mesmas numa solução saturada de hidróxido de cálcio até que a sua massa não varie mais que 0,1% por dia, ficando deste modo saturadas. Após esta fase, procede-se à secagem superficial dos provetes e à sua impermeabilização. Com o auxílio de tinta epoxídica isola-se toda a superfície das amostras, à exceção da base plana por onde irá ocorrer a difusão de cloretos.

Após a secagem da tinta, os provetes são novamente introduzidos na solução saturada de hidróxido de cálcio e, após nova saturação, são finalmente colocados num tanque contendo uma solução saturada de hidróxido de cálcio adicionada de 15% de cloreto de sódio (NaCl).

A norma E390 do LNEC (1993c) propõe que os provetes sejam retirados para análise após 90 dias de imersão. De modo a obter uma melhor perceção do modo de atuação do metacaulino e como este influencia o tempo de difusão dos cloretos no betão, optou-se por fazer recolhas, para além dos 90 dias, também aos 30 e 60 dias. Para cada uma das composições e tempos de exposição foram utilizadas duas amostras.

Após a recolha dos provetes do tanque de ensaio, procede-se ao corte dos mesmos para análise de cloretos. Foram extraídas cinco fatias de 20 mm, obtendo-se assim cinco profundidades para análise e obtenção do perfil de cloretos (Figura 32).



Figura 32 – Amostras de betão

Com o auxílio de um almofariz e um pilão, seguiu-se a moagem da zona central das amostras até que todo o material selecionado passasse por um peneiro de 125 μm .

Após a recolha das amostras, utilizam-se aproximadamente 10 gramas de cada e dissolvem-se em 100 ml de solução de 10% de HNO_3 (ácido nítrico). De seguida, ferve-se a solução durante 10 minutos com recurso a uma placa de aquecimento e mantém-se em fervura durante 15 minutos adicionais (Figura 33). Terminada esta fase, filtra-se a solução através de papel de filtro médio, para um balão de 500 ml, adicionando água quente para uma melhor diluição dos cloretos (Figura 34). Obtidas as amostras, extraíram-se 50 ml de cada uma e voltou a realizar-se a análise por potenciometria, procedimento especificado em 5.4.6.



Figura 33 – Preparação das amostras de betão para análise de cloretos



Figura 34 – Processo de diluição de cloretos

Determinado o perfil de cloretos, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de difusão efetivo, D_E , baseado na 2ª Lei de Fick: (LNEC, 1993c)

$$C_x = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_E t}} \right) \quad (27)$$

Onde:

C_x : teor em cloretos medido à profundidade x para tempo de imersão t [%];

C_s : teor em cloretos à superfície do betão após um tempo de imersão t [%];

C_0 : teor inicial de cloretos no betão;

x : profundidade no betão [m];

erf : função erro, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$;

D_E : coeficiente de difusão efetivo.

Para simplificação do cálculo da função erro, foi utilizada a equação (28), de acordo com o Anexo D da especificação E465 do LNEC (2007):

$$\operatorname{erf}(z) = 1 - (1 + a_1 \times z + a_2 \times z^2 + a_3 \times z^3 + a_4 \times z^4)^{-4} \quad (28)$$

Onde:

$$a_1 = 0,278393$$

$$a_2 = 0,230389$$

$$a_3 = 0,000972$$

$$a_4 = 0,078108$$

Calculada a função erro e conhecido o teor inicial em cloretos, a determinação do coeficiente de difusão aparente, D , e do teor de cloretos à superfície é efetuada com recurso ao método dos mínimos quadrados.

De acordo com a especificação E390-1993 (LNEC, 1993c), pode ainda ser calculado um parâmetro K , para casos particulares que envolvam a comparação entre betões, obtido pela equação (29):

$$K = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_r}{C_s - C_0} \right) \quad (29)$$

5.5. Resultados, Análise e Discussão

Neste subcapítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados. Para cada ensaio foram analisadas várias amostras e os resultados finais obtidos são fruto da aplicação da média aritmética entre todos os valores registados. A par das medidas de localização de resultados, foi também efetuada a análise de dispersão dos mesmos, calculando-se o desvio padrão e o coeficiente de variação que permitem avaliar a representatividade e confiança no valor médio num conjunto de dados. Para melhor compreensão dos resultados, deste ponto em diante as composições terão a seguinte designação:

- Composição Referência – Composição 1 (C1)
- Composição com 10% de Metacaulino – Composição 2 (C2)
- Composição com 20% de Metacaulino – Composição 3 (C3)

5.5.1. Densidade aparente e densidade real

Da média aritmética dos resultados obtidos nos três provetes analisados aos 90 dias para estimar a densidade real e aparente dos três betões, obtiveram-se os valores da massa, volume, peso em suspensão e peso saturado dos mesmos que, com o auxílio das expressões apresentadas em 5.4.1., foram usados para o cálculo das densidades. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 35 e 36.

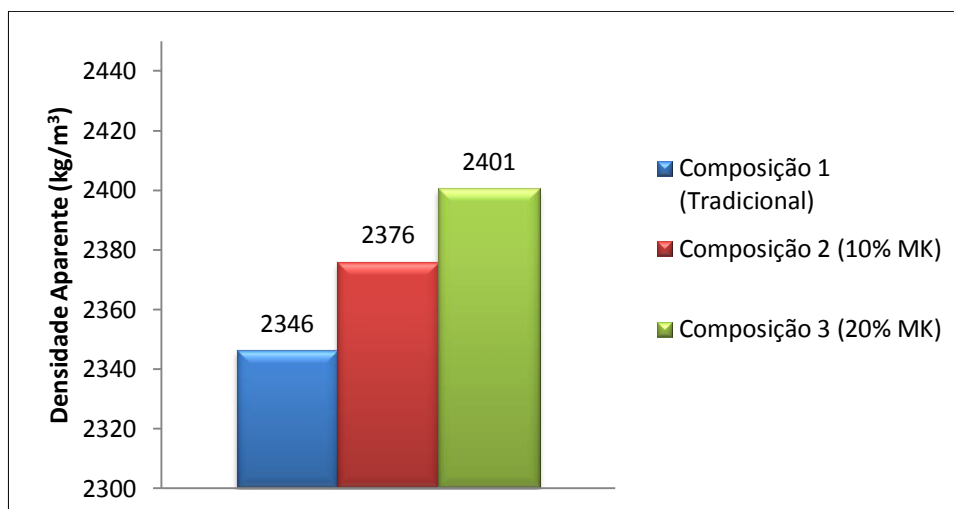


Figura 35 – Densidade Aparente

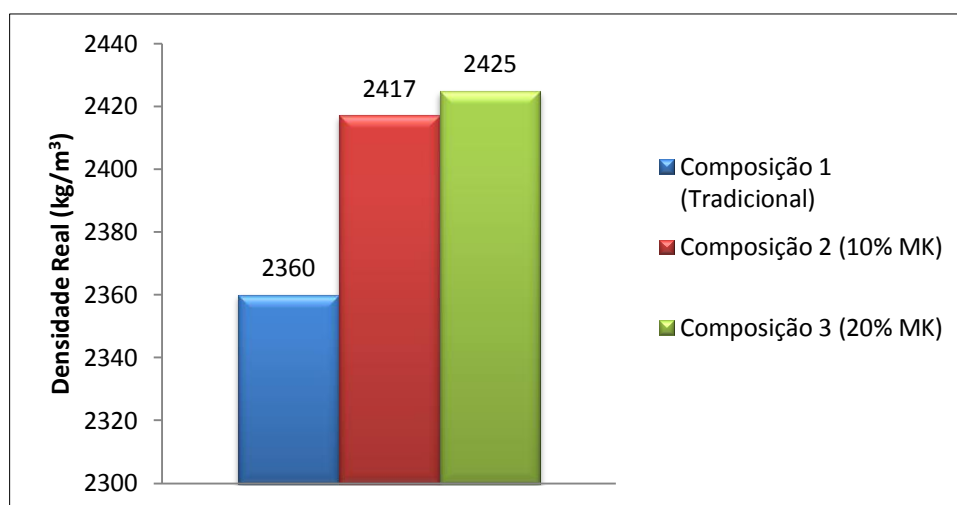


Figura 36 – Densidade Real

Através da análise de resultados, verifica-se um aumento em ambas as densidades (real e aparente) com o aumento da percentagem de metacaulino. Este ligeiro diferencial deve-se fundamentalmente ao efeito *filler* do metacaulino, característica que faz com que a estrutura do betão se densifique, aumentando assim a densidade tanto aparente como real.

5.5.2. Resistência à compressão

Como descrito em 5.4.2. foram ensaiadas três amostras para cada composição de betão e os resultados finais apresentados são produto da média aritmética dos valores obtidos.

Na tabela 17 apresentam-se as médias dos valores de resistência à compressão, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados, para cada uma das composições, nas três idades analisadas.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão

Idade (dias)	Composição 1			Composição 2			Composição 3		
	R _{CM} (MPa)	Desvio Padrão	C.V. (%)	R _{CM} (MPa)	Desvio Padrão	C.V. (%)	R _{CM} (MPa)	Desvio Padrão	C.V. (%)
28	22,87	2,30	10,07	30,50	2,21	7,24	33,30	0,96	2,90
60	26,73	1,33	4,97	33,77	0,93	2,75	35,13	2,08	5,93
90	26,77	0,73	2,85	37,07	1,80	4,87	38,40	2,59	6,76

Após a análise dos resultados obtidos acima apresentados, e com o auxílio dos gráficos apresentados nas Figuras 37 e 38 pode ser verificada, para além de um aumento gradual de resistência em todas as composições com o aumento do tempo de cura, maior resistência em todas as idades para o betão que contém a maior percentagem de substituição de cimento por metacaulino (C3) relativamente às restantes. Verifica-se uma melhoria desta característica entre C1 e C2 de aproximadamente 33%, em média, ao passo que a melhoria verificada de C2 para C3 se fica apenas pelos 6%, em média. Pode também ser observada, como seria expectável, uma tendência para a estabilização dos valores de resistência à compressão com o passar do tempo de cura, uma vez que a taxa hidratação do cimento é cada vez mais reduzida, sendo cada vez menos notória a melhoria na resistência, facilmente identificável em idades menos avançadas.

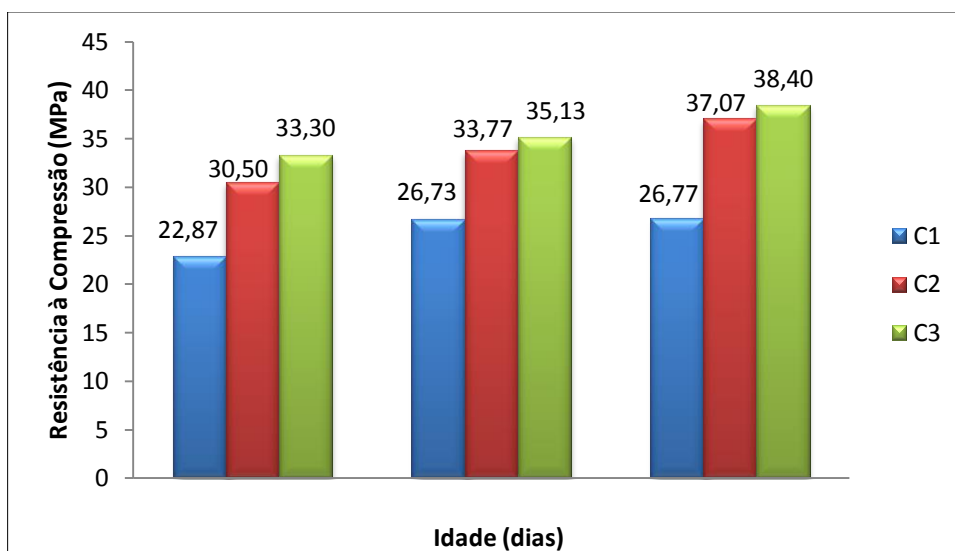


Figura 37 – Resistência à compressão

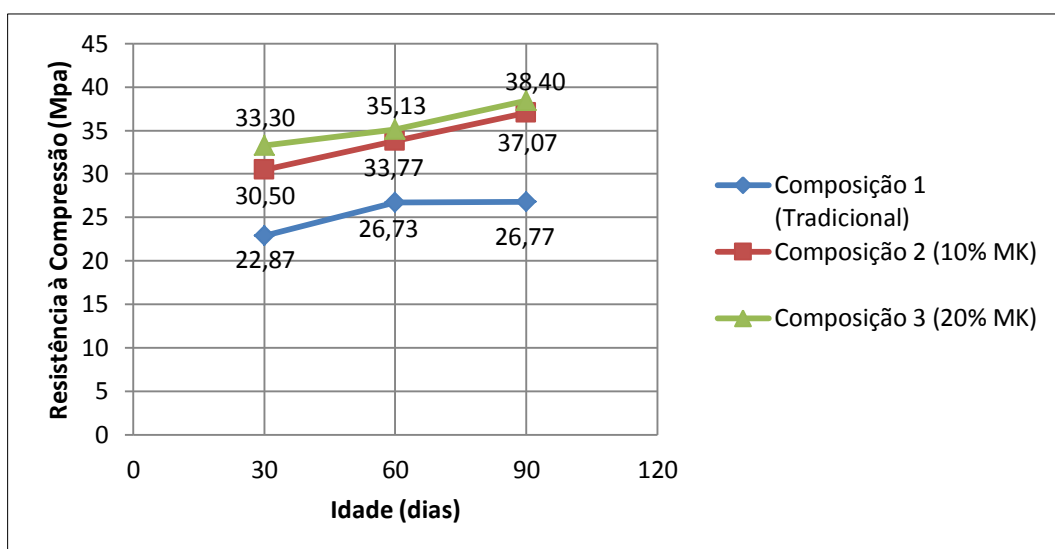


Figura 38 – Evolução da resistência à compressão

Analisando os dados obtidos, pode afirmar-se inequivocamente que a substituição do ligante tradicional por metacaulino melhora claramente a resistência à compressão do betão até aos 90 dias. No entanto, a análise comparativa entre as duas composições com metacaulino revela que o aumento da quantidade de metacaulino não resulta numa melhoria proporcional da resistência mecânica, levando a concluir que uma utilização deste material em elevadas quantidades pode eventualmente deixar de influenciar positivamente as características do betão.

Tal como nos ensaios de densidade, o efeito “*filler*” do metacaulino tem um efeito importante na melhoria da resistência à compressão, aumentando a densidade do betão e, consequentemente, a resistência. Por outro lado, de acordo com Ramezaniyanpour & Bahrami Jovein (2012), as reações pozolânicas que ocorrem com a incorporação do metacaulino na composição do betão, contribuem também para um aumento da resistência do mesmo à compressão, com particular incidência nas primeiras idades.

5.5.3. Ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons

Na Tabela 18 e, com o auxílio do gráfico da Figura 39 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias, para as três composições de betão desenvolvidas. Pela análise dos resultados, pode verificar-se uma grande melhoria nesta característica, à medida que a percentagem de metacaulino aumentam devido ao efeito de compacidade introduzido

pelo metacaulino. Pode portanto concluir-se que, a incorporação de metacaulino em substituição do ligante tradicional, confere um maior módulo de elasticidade ao betão.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons

Composição	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MPa)
C1 (Referência)	38624
C2 (10% MK)	43348
C3 (20% MK)	47265

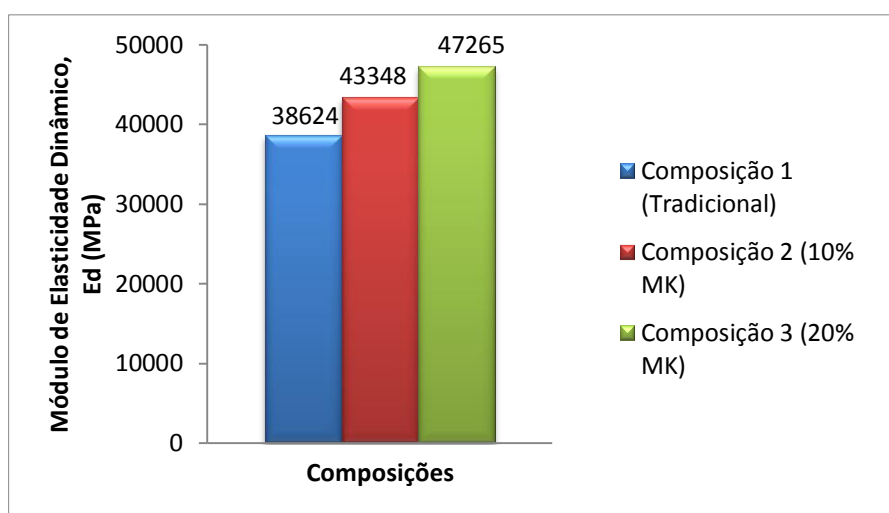


Figura 39 – Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d

5.5.4. Absorção de água

➤ Imersão

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado de acordo com a especificação E394 e, com o auxílio do procedimento especificado em 5.4.4. e a expressão (18), foi calculada a percentagem de absorção de água para cada uma das três amostras analisadas para cada composição e os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Composição	Absorção de água por imersão (%)
C1 (Referência)	8,16
C2 (10% MK)	6,23
C3 (20% MK)	5,28

Analisando os resultados acima apresentados, pode observar-se uma diminuição da absorção de água por parte do betão quanto maior for a percentagem de metacaulino utilizado na composição. Este facto pode dever-se, tal como no caso da análise das densidades, ao efeito “*filler*” do metacaulino que, fazendo com que a densidade do betão aumente e densificando a estrutura do mesmo, reduz a estrutura porosa (número e dimensão de poros), melhorando assim a capacidade do betão para resistir à absorção de água, tornando-o desta forma, menos permeável. O gráfico apresentado na Figura 40 ajuda a perceber com mais clareza a diferença entre a absorção de água para cada composição.

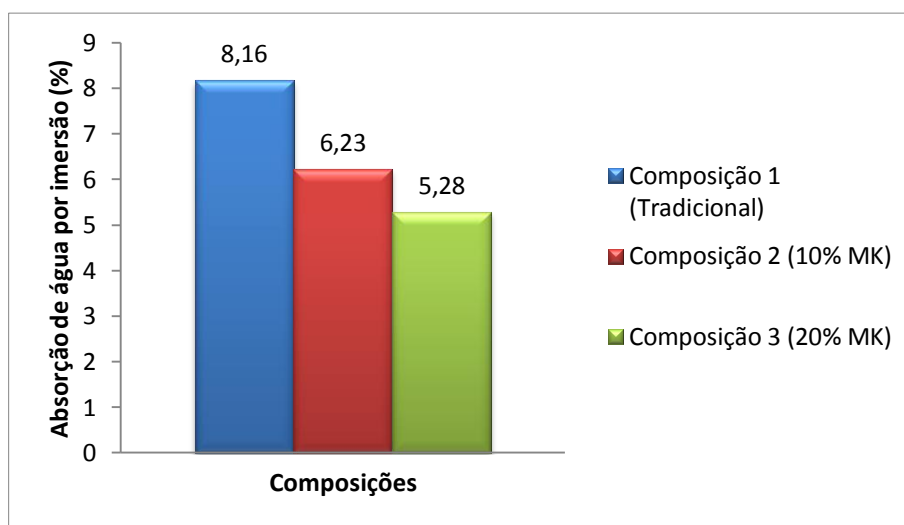


Figura 40 – Absorção de água por imersão

➤ Capilaridade

Seguindo o procedimento especificado na norma E393 do LNEC (1993a), foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade. Tal como referido em 5.4.4., foram feitas pesagens de duas amostras de cada composição e registados os pesos das mesmas para os tempos de 3, 6, 24 e 72 horas. Os resultados apresentados na Tabela 20 são relativos à absorção de água por capilaridade para cada dos tempos, calculada dividindo o aumento de massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete, são apresentados em grama por milímetro

quadrado (g/mm^2) e resultam da média aritmética dos resultados obtidos para as duas amostras de cada composição.

Tabela 20 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

Composição	A _{3h}	A _{6h}	A _{24h}	A _{72h}
C1 (Referência)	0,001471	0,001981	0,003452	0,004895
C2 (10% MK)	0,001443	0,001698	0,003141	0,004216
C3 (20% MK)	0,000934	0,001103	0,001811	0,002490

Analisando a tabela, e com o auxílio do gráfico da Figura 41, conclui-se que a absorção de água por capilaridade diminui à medida que percentagem de metacaulino utilizada em substituição do ligante aumenta. A absorção de água é mais significativa nas amostras da composição C1, sem metacaulino e mais reduzida na composição C3, com a maior percentagem de material pozolânico. É importante referir ainda o facto de se observar uma melhoria bastante mais visível quando comparadas as composições C3 a C2, relativamente a C2 e C1. De acordo com Siddique & Klaus (2009), o metacaulino modifica a estrutura dos poros do betão e reduz significativamente a permeabilidade do mesmo, resultando numa melhora significativa da resistência ao transporte de água.

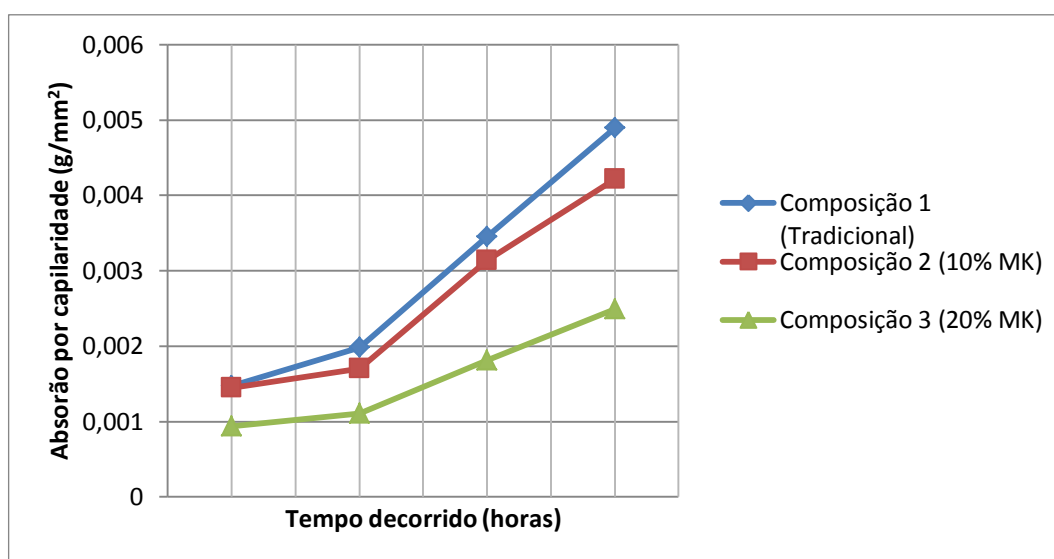


Figura 41 – Absorção de água por capilaridade

A par da absorção foi também analisada a ascensão capilar através da determinação da altura da água que ascende através das paredes das amostras de cada composição, para os mesmos tempos, sendo os resultados apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados da ascensão capilar pelo ensaio de absorção de água por capilaridade

Composição	$h_{m,3h}$ (mm)	$h_{m,6h}$ (mm)	$h_{m,24h}$ (mm)	$h_{m,72h}$ (mm)
C1 (Referência)	31	34	57	65
C2 (10% MK)	27	32	56	64
C3 (20% MK)	19	25	30	40

Por observação do gráfico da Figura 42 conclui-se que, tal como a absorção de água, também a ascensão capilar diminui com o aumento da presença de metacaulino na composição. A explicação para o facto deve-se fundamentalmente à atuação do metacaulino na matriz do betão, alterando a mesma, e melhorando assim a sua capacidade de resistência à penetração de água. Devido ao efeito de “*filler*” que o metacaulino provoca na estrutura do betão, ocorre uma diminuição do número e dimensão dos poros no betão, o que faz conduzir a uma diminuição da velocidade de absorção de água. Conclui-se, deste modo, que a diminuição da absorção de água e da ascensão por capilaridade se encontra diretamente relacionada com a diminuição da porosidade total nos betões, devido à atuação do metacaulino.

De notar ainda que, entre as 6h e as 24h do ensaio ocorre um importante aumento na altura de água nas amostras relativas a C1 e C2, normalizando e diminuindo a velocidade de ascensão das 24h até às 72h, altura em que termina o ensaio. outra das conclusões retiradas prende-se com o facto de, embora a altura de ascensão capilar seja bastante aproximada nas composições C1 e C2, ocorre uma menor absorção de água na segunda, contendo metacaulino.

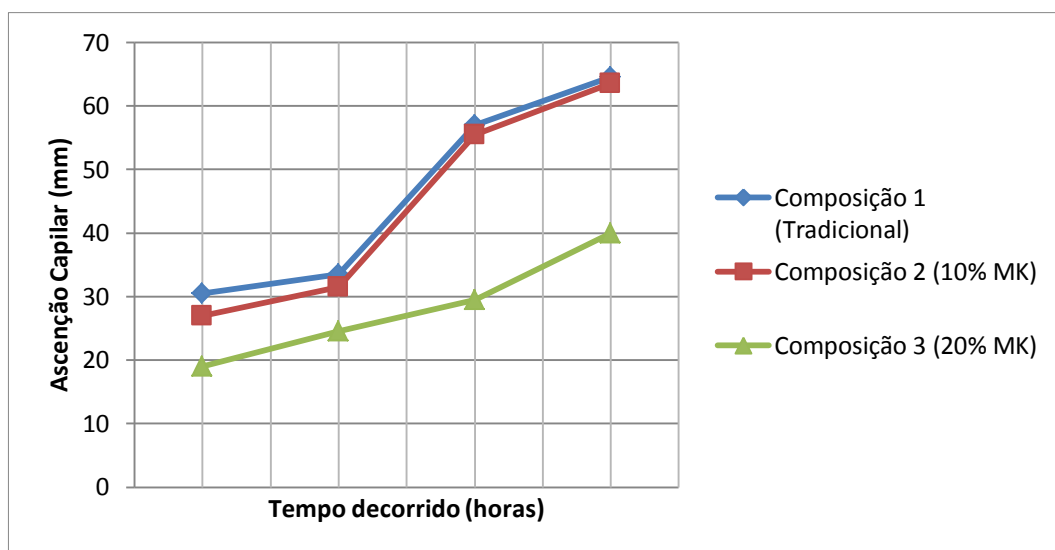


Figura 42 – Ascensão capilar no betão ao longo do tempo

5.5.5. Ensaio de migração rápida (CTH Rapid Chloride Migration Test)

Este ensaio permite, tal como o nome sugere, a determinação de forma rápida, da penetração de cloretos no betão. Através do procedimento especificado em 5.4.5., auxiliado das expressões matemáticas também fornecidas, obtiveram-se os resultados apresentados de seguida. Como referido anteriormente, para além dos ensaios aos 28 dias de idade, optou-se também por ensaiar amostras aos 90 dias tentando, desta forma, avaliar a evolução da resistência das diferentes composições à penetração de cloretos, com o tempo de cura. Na Tabela 22, apresentam-se os resultados obtidos e, de seguida, discutem-se os mesmos.

Tabela 22 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 28 e 90 dias para o ensaio CTH

Idade	Composição 1			Composição 2			Composição 3		
	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Desvio Padrão	C.V. (%)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Desvio Padrão	C.V. (%)	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Desvio Padrão	C.V. (%)
28 dias	38,530	4,39	11,4	14,851	2,86	19,3	8,272	1,26	15,2
90 dias	37,747	5,41	14,3	12,276	1,52	12,4	7,388	1,45	19,6

Através dos resultados apresentados, pode ser observada uma clara melhoria na capacidade de resistência à penetração de cloretos quanto maior a percentagem de metacaulino utilizada na composição. A composição C3 apresenta-se claramente como a mais resistente a este agente agressivo sendo a composição C1 (sem adição de metacaulino) a que apresenta o pior resultado. A composição C1 apresenta o coeficiente de difusão mais elevado, registando-se uma média de $38,530 \times 10^{-12}$ m²/s, seguida da composição C2 com $14,851 \times 10^{-12}$ m²/s e, por fim, pela composição C3 com uma média de penetração de $8,272 \times 10^{-12}$ m²/s. É possível observar-se uma melhoria mais acentuada quando comparadas as composições C1 e C2, devido à adição do metacaulino. Comparando as composições C2 e C3, regista-se também uma melhoria mas, desta feita, menos representativa que no caso anterior, levando a crer que, tal como nos ensaios anteriormente discutidos, a utilização de metacaulino deixa de fazer o efeito positivo esperado a partir de uma certa percentagem podendo, eventualmente, revelar-se prejudicial para percentagens mais elevadas.

Outra das conclusões retiradas, com recurso aos ensaios realizados aos 90 dias de cura, é que a capacidade de resistência dos betões à ação de cloretos não é influenciada de forma significativa pelo tempo de cura mas sim, em larga escala, pela sua composição. Através da

apreciação dos resultados apresentados na Tabela 22, observa-se uma aparente preservação da resposta do betão quando confrontado com ataques deste agente agressivo, independentemente do tempo de cura dos provetes. As composições C2 e C3 continuam a ser, desta forma, manifestamente mais apelativas quando comparadas com a composição C1, não melhorando, no entanto, o seu desempenho.

Não podendo concluir-se sumariamente que não ocorrem melhorias da capacidade de resistência à penetração de cloretos por parte dos betões para um aumento mais considerável do tempo de cura, pode, no entanto, afirmar-se que, para intervalos de tempo relativamente reduzidos, como os estudados, esta melhoria não é significativa para que possa ser levada em consideração.

Pode ainda verificar-se que os valores desvio-padrão e, conseqüentemente, coeficientes de variação, são ligeiramente superiores ao que seria desejável. A natureza deste acontecimento pode residir no facto de as medições da penetração de cloretos utilizadas no cálculo do coeficiente de difusão são efetuadas manualmente (com o auxílio de uma craveira digital), e o erro associado a este tipo de medição é normalmente elevado. Por outro lado, a complicada preparação do ensaio, especialmente no que toca à correta e total impermeabilização de superfície lateral do provete, pode levar a que ocorram migrações de cloretos de forma mais ou menos rápida, podendo eventualmente conduzir a diferenças nos resultados obtidos para a mesma composição.

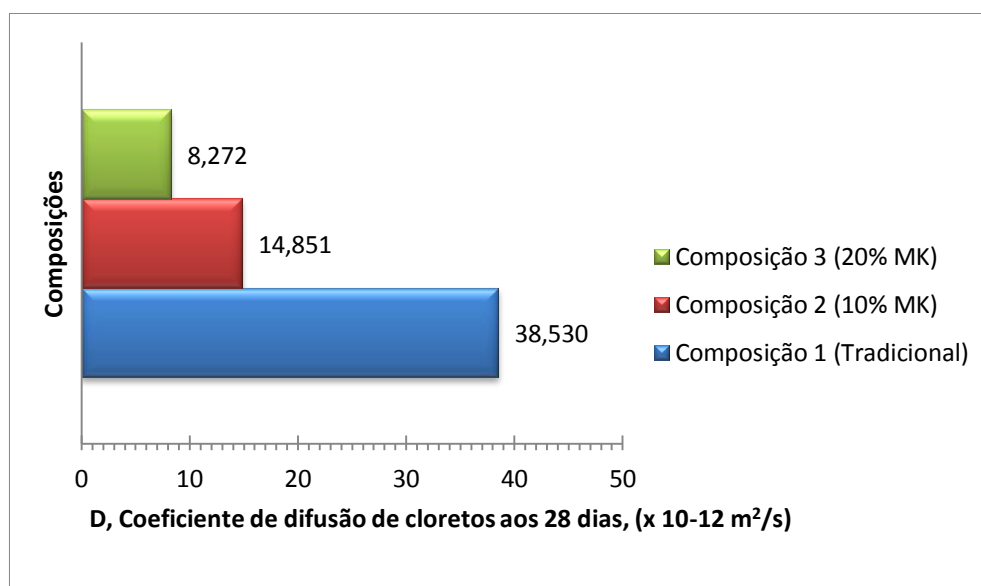


Figura 43 – Coeficiente de difusão de cloretos aos 28 dias para o ensaio CTH

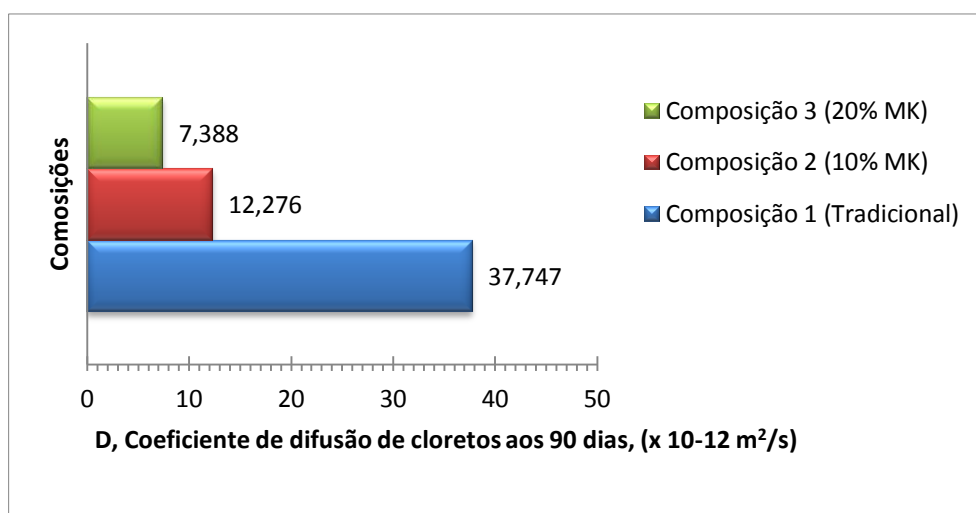


Figura 44 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 90 dias para o ensaio CTH

A heterogeneidade característica do betão é também um fator que pode levar à obtenção de resultados díspares entre as amostras, fazendo também com que o erro associado aumente.

Posto isto, importa referir que os valores ligeiramente elevados registados neste ensaio têm uma importância relativa na análise e conclusões retiradas dado que, sendo o principal objetivo deste ensaio a análise comparativa entre as composições e não a obtenção de um valor exato relativo ao coeficiente de difusão, D , os resultados obtidos servem de forma inequívoca o objetivo que se pretende alcançar.

As diferenças observadas entre as três composições podem mais facilmente ser compreendidas com o auxílio das Figuras 43 e 44.

5.5.6. Método da célula de difusão

O ensaio da célula de difusão foi executado de acordo a especificação E383 do LNEC (1993d). Após a montagem do ensaio, descrito em 5.4.6. procedeu-se à colheita periódica de amostras para análise potenciométrica com a objetivo de determinar a quantidade de cloretos que passa, ao longo do tempo, através das amostras de betão.

Como seria de esperar, as soluções recolhidas na primeira semana de ensaios não mostraram qualquer tipo de presença de iões de cloreto, sendo os valores medidos com recurso a um analisador multi-parâmetros (Figura 30) inferiores ao limite mínimo de quantificação. Com o auxílio dos gráficos das Figuras 45 a 50 e das tabelas apresentadas no Anexo VII, pode verificar-se uma ligeira diferença entre os teores em cloretos para as três

composições. Tal como no ensaio de migração rápida, a Composição 3, que contém a maior percentagem de metacaulino, é a que apresenta o melhor desempenho quando na presença de iões cloreto sendo que, a Composição 1 é a que apresenta um pior comportamento na resistência à penetração de cloretos.

Apesar de ser possível verificar-se esta ligeira diferença, os valores alcançados são muito baixos, muitos próximos do limite mínimo de quantificação, e bastante semelhantes e, desta forma, torna-se impossível o cálculo do coeficiente de difusão em que, o único parâmetro que distingue as amostras é precisamente o coeficiente angular da reta correspondente à representação do teor de cloretos.

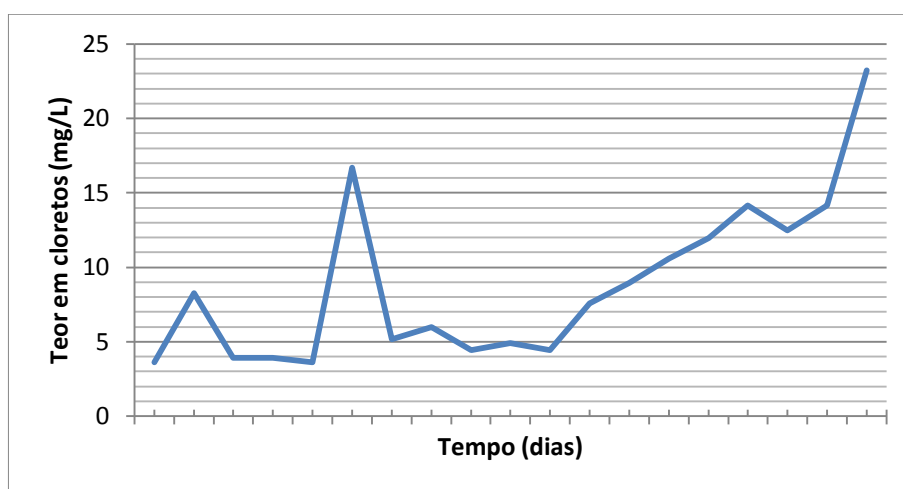


Figura 45 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 1 – Amostra 1)

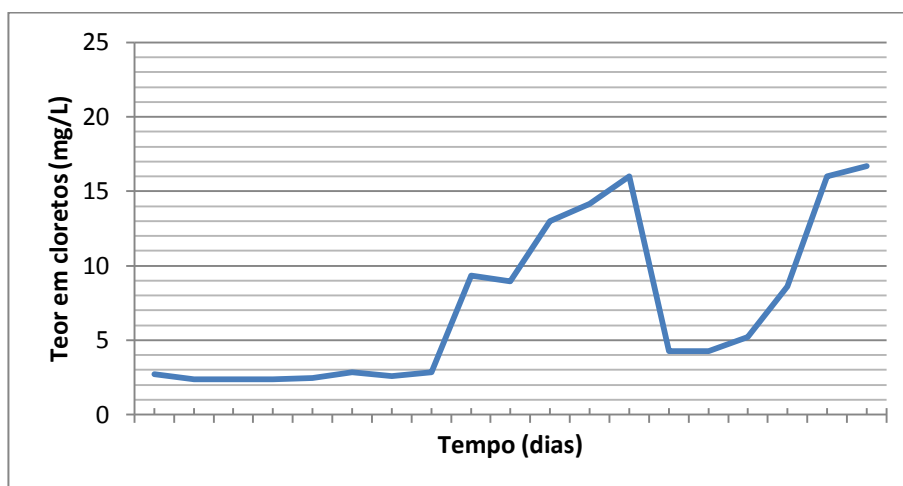


Figura 46 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 1 – Amostra 2)

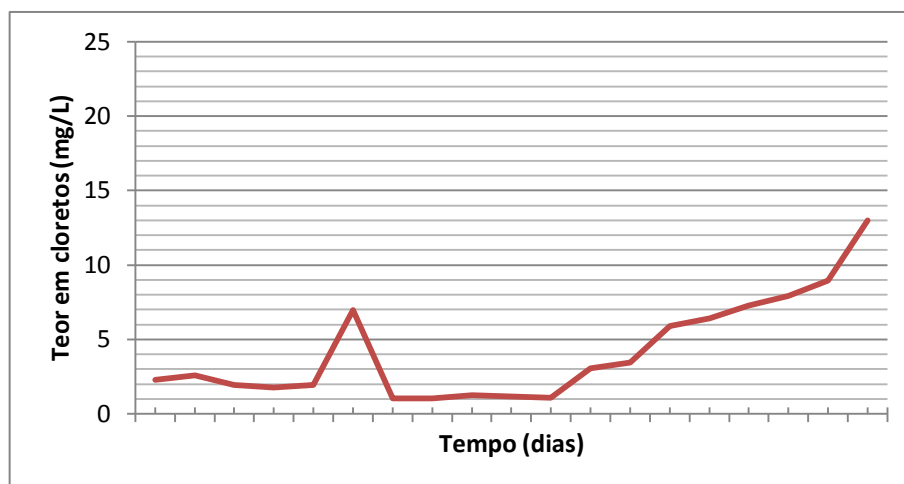


Figura 47 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 2 – Amostra 1)

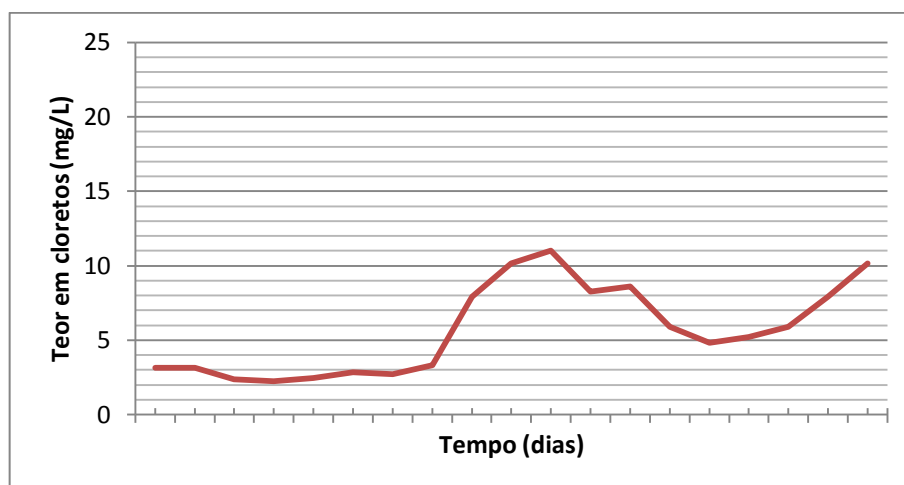


Figura 48 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 2 – Amostra 2)

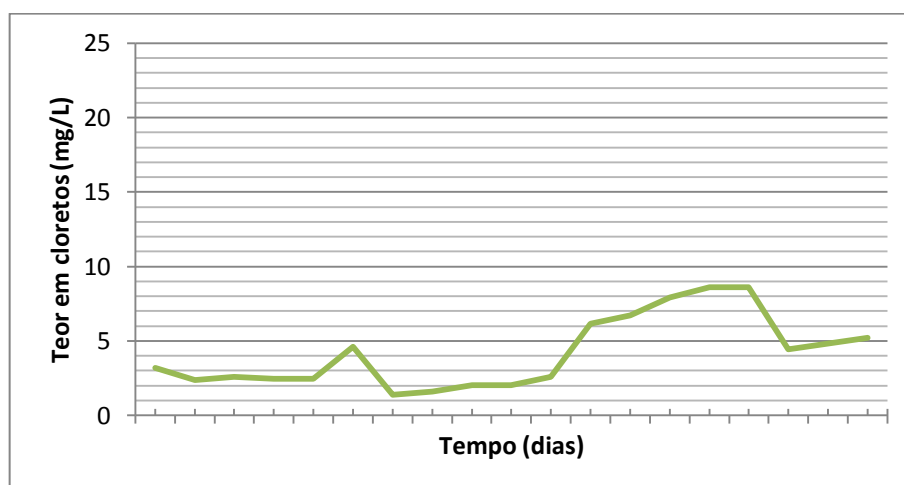


Figura 49 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 3 – Amostra 1)

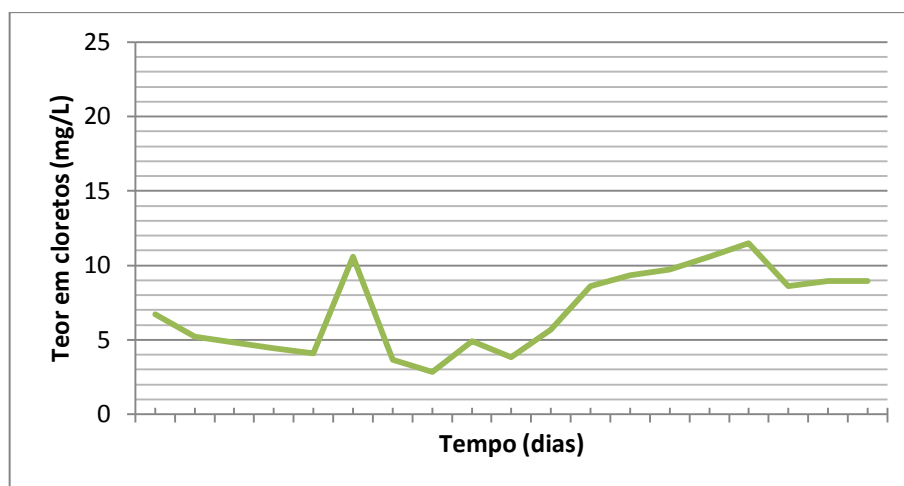


Figura 50 - Teor em cloretos para o ensaio da célula de difusão (Composição 3 – Amostra 2)

Através da análise dos gráficos acima apresentados, pode concluir-se que, apesar de não ser possível determinar valores de coeficiente de difusão, outro dos objetivos da realização deste ensaio foi alcançado, com a demonstração da maior resistência dos betões com metacaulino à penetração e difusão de iões cloreto. Este facto é suportado pelos dados recolhidos relativos ao teor em cloretos ao longo do tempo que, no caso da composição com maior percentagem de metacaulino (C3), apresenta valores situados no intervalo entre os 5 e 10 mg/L em ambas as amostras da mesma, para os tempos mais adiantados dos ensaios, entre os 50 e os 55 dias. Já no caso da Composição 2, os teores em cloretos situam-se em intervalos entre os 6 e os 14 mg/L para os mesmos tempos o que indicia uma menor resistência em relação à Composição 3. Por fim, analisando os valores para a composição sem adição de metacaulino (C1), registam-se valores que vão até aos 25 mg/L para ambas as amostras analisadas e em relação ao mesmo intervalo de tempo, o que denuncia uma menor tolerância desta composição à penetração de cloretos e, consequentemente, um pior desempenho na presença deste agente agressivo.

Relativamente aos resultados não tão satisfatórios alcançados neste ensaio, pode concluir-se que se trata de um ensaio de natureza bastante sensível e que implica uma preparação extremamente cuidada necessitando, devido aos valores bastante reduzidos registados para os teores em cloretos, de aparelhos de análise de cloretos de grande qualidade e rigor. Um dos obstáculos que pode ser observado através da análise dos resultados, passa pela oscilação nos valores, ou seja, a obtenção de teores inferiores a outros alcançados anteriormente o que, teoricamente não se deveria verificar, sendo esperadas curvas sempre crescentes, tal como os teores em cloretos presentes nas soluções.

5.5.7. Ensaio de imersão

O ensaio de imersão, especificado na norma E390 do LNEC (1993c) e apresentado em 5.4.7. é um método de longa duração de determinação de coeficientes de difusão de iões cloreto em betões. Após a realização dos procedimentos especificados anteriormente, procedeu-se à recolha de resultados, apresentados de seguida, com auxílio dos gráficos das Figuras 51 a 53.

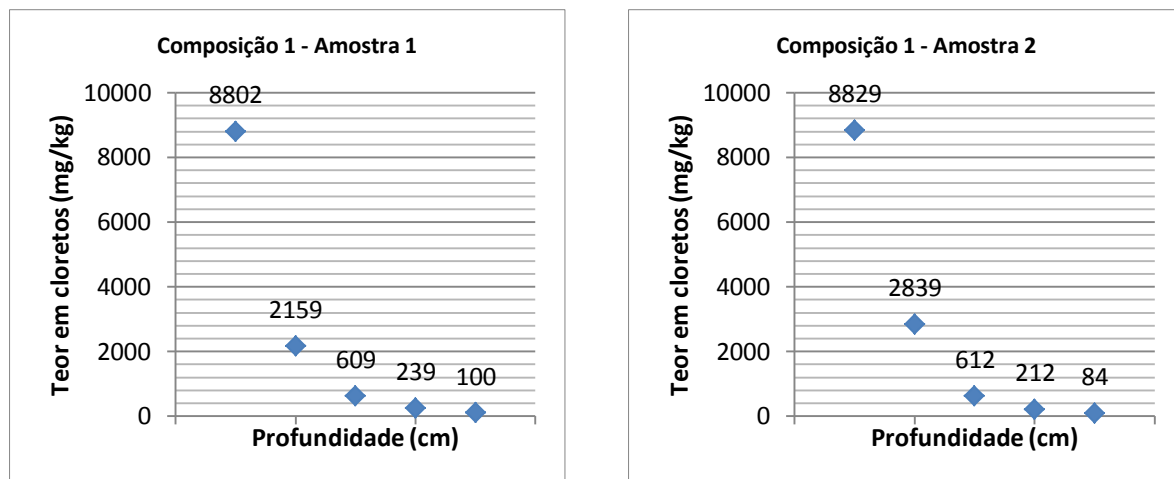


Figura 51 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 1 para o ensaio de imersão

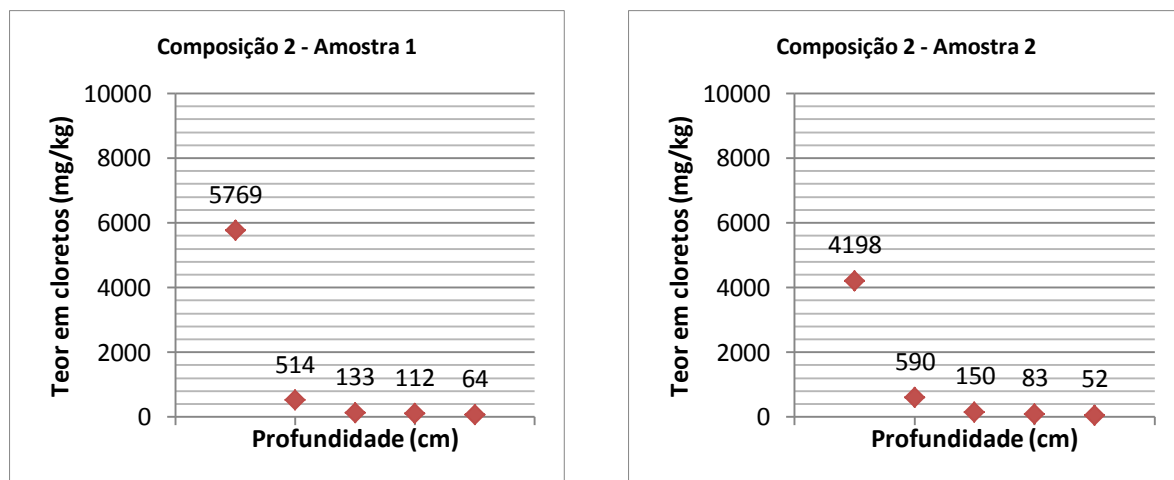


Figura 52 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 2 para o ensaio de imersão

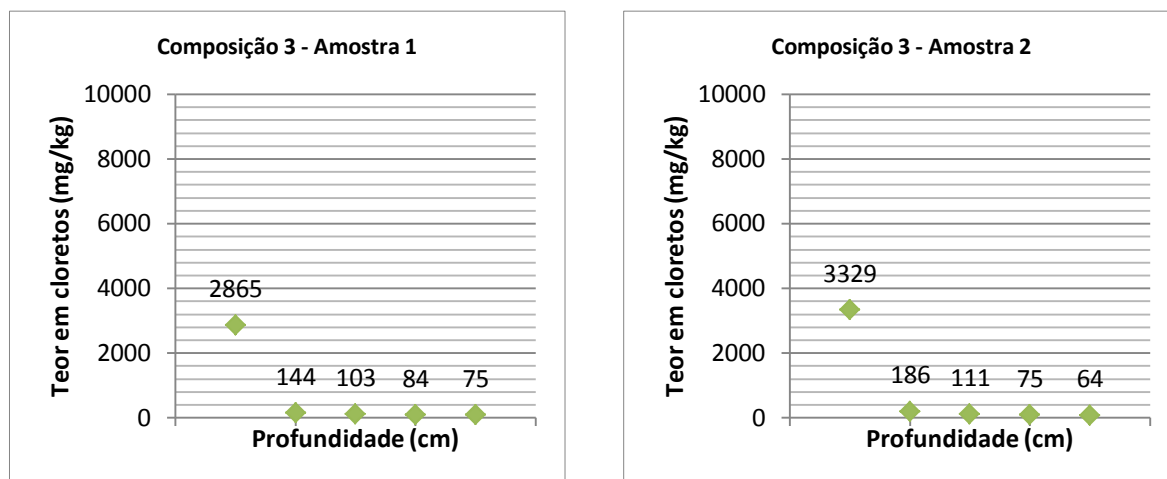


Figura 53 – Teor em cloretos nas amostras da Composição 3 para o ensaio de imersão

Através da análise do teor em cloretos para cada amostra de cada composição pode concluir-se, como era expectável, que as composições com adição de metacaulino apresentam uma maior resistência à penetração de cloretos, facto evidenciado pelo menor teor para todas as profundidades relativamente à composição base. Pode verificar-se que, para a composição 1, em ambas as amostras, ocorre uma razoável propagação de cloretos até à camada entre os 6 e 8 cm de profundidade enquanto para a composição 2 os valores registados nesta mesma camada são apenas residuais indicando que os cloretos não terão alcançado esta profundidade. O mesmo se verifica para a composição 3, com a maior percentagem de metacaulino, em que são detetados razoáveis teores em cloretos na camada mais superficial (até aos 2 cm de profundidade) e, a partir desta, os valores são bastante reduzidos o que pressupõe uma dificuldade de propagação de cloretos ainda mais acentuada.

De acordo com J. J. d. O. Andrade (2001), citando Helene (1993), a concentração superficial de cloretos é uma propriedade dependente de parâmetros relacionados com o betão – tipo e quantidade de cimento, presença de adições, relação água-cimento, entre outros – e ao meio ambiente – concentração ambiental de cloretos, ciclos de molhagem/secagem, direção preferencial dos ventos, topografia local, entre outros.

Desta forma e, com recurso a estudos efetuados, nomeadamente por J. J. d. O. Andrade (2001) e Rizzon (2006), e tendo também em conta o valor obtido através do modelo de propagação de cloretos apresentado em 6.4. adotou-se um valor inicial de 1,5% para a concentração superficial de cloretos no betão. O mesmo valor foi adotado para todas as concentrações visto que as características dos betões são idênticas bem como as condições de

exposição. Partindo deste valor, e com recurso ao método dos mínimos quadrados aplicado à equação (27), foram determinados os coeficientes de difusão e o teor em cloretos à superfície do betão, C_s .

Tabela 23 – Coeficientes de difusão e concentração superficial de cloretos aos 90 dias para o ensaio de imersão

Composição	Concentração superficial de cloretos, C_s (%)	Coeficiente de difusão, D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)
C1 (Referência)	1,28	36,3
C2 (10% MK)	1,28	11,2
C3 (20% MK)	1,28	4,6

Através da análise da Tabela 23 e com o auxílio gráfico da Figura 54, pode observar-se uma diminuição significativa do coeficiente de difusão de cloretos à medida que a percentagem de metacaulino aumenta.

A composição 3, que contém a maior quantidade de metacaulino, apresenta claramente o melhor desempenho na resistência à penetração de iões cloreto, com valores médios na ordem dos 36×10^{-12} m²/s, valor bastante superior aos 11×10^{-12} m²/s registados para a composição 2 e aos $4,6 \times 10^{-12}$ m²/s da composição sem metacaulino (C1), que apresenta a pior capacidade de resistência.

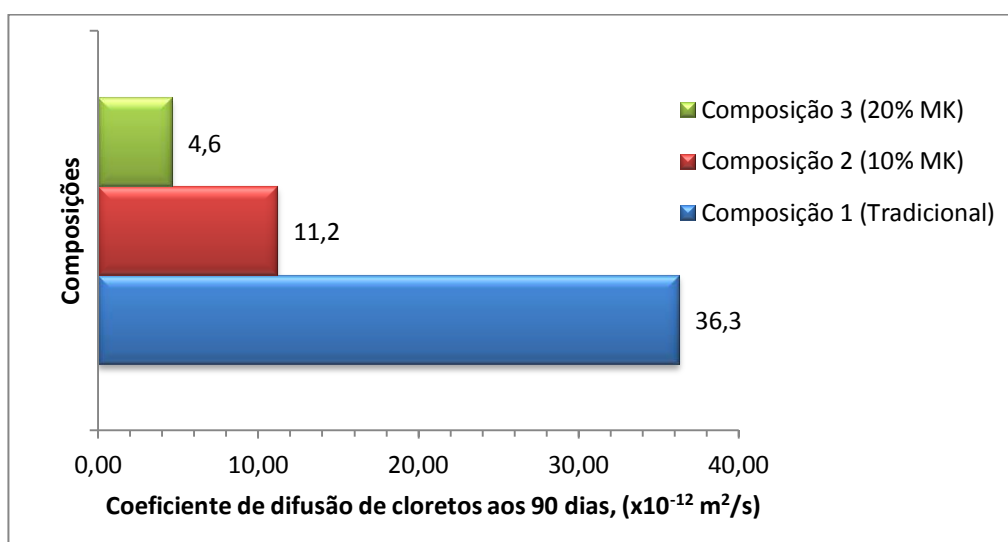


Figura 54 – Coeficientes de difusão de cloretos aos 90 dias para o ensaio de imersão

Com auxílio dos resultados obtidos no ensaio de imersão, efetuou-se uma regressão não-linear na tentativa obter uma estimativa do coeficiente de difusão em função da percentagem de substituição por metacaulino.

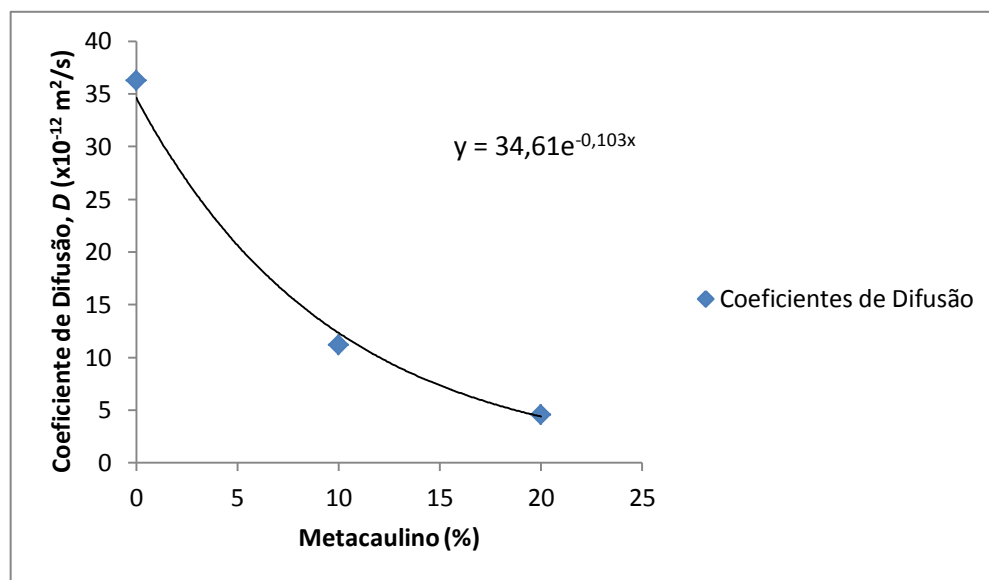


Figura 55 – Coeficiente de difusão em função da percentagem de metacaulino

De acordo com o gráfico da Figura 55, pode então concluir-se que o coeficiente de difusão pode ser estimado, tendo em conta a percentagem de substituição por metacaulino, de acordo com a expressão (30).

$$D = 34,61e^{-0,103x} \quad (30)$$

Onde:

D : coeficiente de difusão de cloretos [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$];

Mk : substituição de ligante por metacaulino [%].

Os resultados detalhados do ensaio são apresentados em Anexo.

6. MODELOS DE DURABILIDADE

6.1. Introdução

A par dos ensaios práticos especificados anteriormente que permitem calcular coeficientes de difusão de cloretos e, consequentemente, estimar a propagação de mesmos no betão e aferir sobre sua durabilidade, apresenta-se ainda uma outra solução que passa pela aplicação de modelos matemáticos, baseados em dados empíricos que pretendem estimar o tempo de vida útil das estruturas de betão.

A utilização de modelos numéricos para estimar a durabilidade de estruturas tem aumentado de forma significativa nos últimos anos, tendo vindo a ser desenvolvidos modelos para estimar todos os processos de degradação conhecidos.

Segundo Ferreira (2000), os modelos de durabilidade podem ser divididos em três grupos:

- Modelos de degradação;
- Modelos de desempenho;
- Modelos de vida útil em serviço;

Estes modelos podem ainda ser determinísticos ou estocásticos. No caso dos modelos determinísticos, com a utilização dos parâmetros conhecidos, obtém-se um valor único de degradação, desempenho ou vida útil. Por outro lado, com a utilização de modelos estocásticos, faz-se uma projeção da vida de serviço da estrutura e calcula-se a probabilidade desta ser inferior à vida útil.

No caso concreto da propagação de cloretos no betão, os modelos utilizados passam pela determinação da vida útil da estrutura.

6.2. Definições

Neste ponto são apresentadas definições que importa conhecer e ter em conta, no estudo e desenvolvimento de modelos de durabilidade.

- Vida útil (de projeto) – período de tempo durante o qual se admite que uma estrutura ou parte dela é usada para o fim pretendido, sem grandes reparações.
- Manutenção – conjunto de atividades executadas durante a vida útil da estrutura de forma a permitir-lhe satisfazer os requisitos de fiabilidade.
- Fiabilidade – aptidão de uma estrutura ou elemento estrutural para preencher os requisitos especificados, incluindo a vida útil, para os quais foi projetada. A fiabilidade é em geral expressa em termos probabilísticos e envolve segurança, utilização e durabilidade.
- Critérios de projeto – formulações quantitativas que descrevem, para cada estado limite, as condições que devem ser satisfeitas.
- Estados limites – estados para além dos quais a estrutura deixa de preencher os critérios relevantes do projeto. Dividem-se em estados limites últimos – geralmente associados ao colapso da estrutura ou a uma forma considerada semelhante – e estados limites de utilização – quando as condições de serviço especificadas não são satisfeitas.
- Ação –
 - a) Conjunto de forças (cargas) aplicadas à estrutura (ação direta)
 - b) Conjunto de deformações impostas ou acelerações causadas, por exemplo, por variações de temperatura e humidade (ação indireta).
- Degradação – diminuição gradual do desempenho de um material ou estrutura.
- Fator de degradação – qualquer grupo de fatores externos, incluindo exposição ambiental, biológica, tensão, incompatibilidade do material ou utilização, que afetam adversamente o desempenho do material ou estrutura.
- Modelo de degradação – função matemática que traduz a degradação no tempo.
- Modelo de durabilidade – modelo de cálculo da degradação, do desempenho ou da vida útil.
- Modelo de desempenho – função matemática que traduz o desempenho no tempo.
- Desempenho – medida para a qual a estrutura cumpre determinada função.

- Risco – multiplicação da probabilidade de rotura pela quantidade de estragos.

6.3. Modelos de propagação de cloretos no betão

Neste ponto são apresentados três modelos de propagação de cloretos no betão, desenvolvidos por diferentes autores e organizações. Será dada uma maior ênfase ao modelo de Tutti, que serve de base ao modelo desenvolvido na especificação E465 do (LNEC, 2007) que, por ser o mais utilizado, será mais aprofundado.

6.3.1. Modelo de Xi e Bazant

Este modelo foi apresentado por Xi & Bazant (1999) e introduz uma abordagem mais pormenorizada à ação de cloretos no betão e faz claramente a distinção entre os fatores que influenciam a difusão de cloretos nomeadamente a temperatura, a concentração de cloretos e o efeito dos agregados.

De acordo com o estudo, deve ter-se em linha de conta as capacidades de difusão de cada um dos constituintes do betão, como pode ser observado na equação (31):

$$D_{eff} = D_m \left\{ 1 + \frac{g_i}{[(1 - g_i)/3] + [D_m/(D_i - D_m)]} \right\} \quad (31)$$

Onde:

D_m : capacidade de difusão do ligante;

D_i : capacidade de difusão dos agregados;

g_i : fração de volume correspondente aos agregados;

D_{eff} : difusão efetiva.

Por outro lado, deve ter-se também em conta a temperatura a que se encontra a estrutura, de acordo com a equação (32):

$$D_T = D_0 \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (32)$$

Onde:

T_0 : temperatura de referência [K];

T : temperatura real [K];

D_T : difusão à temperatura T ;

D_0 : difusão para a temperatura T_0 ;

R : constante dos gases perfeitos (apresentada em 5.4.5.);

U : energia de ativação do processo de difusão.

Por fim, deve também ser tida em conta a concentração de cloretos dada pela equação (33):

$$D_{i\tilde{a}o} = D' [1 - k_{i\tilde{a}o} (C_f)^m] \quad (33)$$

Com:

$$D' = RT\Lambda_0 / F^2 |Z_{i\tilde{a}o}| \quad (34)$$

$$k_{i\tilde{a}o} = k_c / \Lambda_0 \quad (35)$$

Onde:

$D_{i\tilde{a}o}$: difusão iônica;

C_f : concentração de iões livres;

Λ_0 : condutância molar de referência,;

F : constante de Faraday;

$Z_{i\tilde{a}o}$: valência do ião.

K_c e m são constantes.

Por fim, a expressão geral correspondente à difusão de cloretos apresenta-se em (36):

$$D_{Cl} = f_{Cl} D_m \left\{ 1 + \frac{g_i}{[(1 - g_i)/3] + [1/(D_i/D_m - 1)]} \right\} \cdot \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] [1 - k_{i\tilde{a}o} (C_f)^m] \quad (36)$$

Nota: O parâmetro f_{Cl} corresponde à conjugação de todas as constantes das presentes nas equações que dão origem à expressão (36).

6.3.2. Modelo Hetek

De acordo com Frohnsdorff (1999), o Hetek trata-se de um modelo de previsão de vida útil e penetração de cloretos em estruturas de betão armado e baseia-se em observações efetuadas na Träslövsläge Marine Exposure Station, situada no Suécia. Baseado em dados obtidos através do ensaio NT Build 443 (ver 5.4.7.) este modelo é utilizado para determinação do tempo de iniciação da corrosão por ação de cloretos. Através da sua aplicação pode ser também determinado o perfil de cloretos em qualquer altura da vida da estrutura.

Os parâmetros necessários para a sua utilização são:

- As proporções da mistura de betão;
- A classe de exposição da estrutura a cloretos;
- A espessura de recobrimento do aço.

O perfil de cloretos obtido é caracterizado por quatro parâmetros: tempo de exposição, t ; concentração de cloretos à superfície, C_s ; a concentração inicial de cloretos, C_i ; e o coeficiente de difusão, apresentado em (37):

$$D = a^2 / \pi t \quad (37)$$

Onde a corresponde à distância que o cloreto teria penetrado se o gradiente de concentração de cloretos fosse constante e tivesse o valor do gradiente à superfície.

A parte experimental correspondente a este modelo passa pela obtenção de betão da estrutura a estudar utilizando o método dos núcleos invertidos, que consiste na remoção de uma amostra e na colocação da mesma de volta à estrutura mas com a parte não afetada virada para fora. Seguidamente, mede-se a penetração de cloretos em diferentes intervalos de tempo, obtendo-se assim o perfil de cloretos.

6.3.3. Modelo de Tutti

O modelo de vida útil mais frequentemente referido para estimar a durabilidade de estruturas de betão sujeitas a carbonatação ou ataques de cloretos foi introduzido por Tutti no ano de 1982 e parte do princípio que a vida útil é dada pela soma da duração de duas fases: período de iniciação e período de propagação (Salta, 1999).

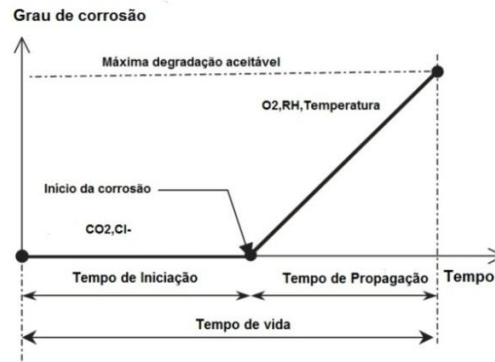


Figura 56 - Modelo de vida útil de uma estrutura sujeita a corrosão (Zhang & Lounis, 2006)

6.3.3.1. Período de Iniciação

De acordo com Salta (1999), o tempo de iniciação começa na construção da estrutura e estende-se até à altura em que se criam condições para a despassivação do aço. Estas condições são atingidas quando o teor de cloretos ultrapassa um valor crítico. Como referido anteriormente, a penetração de cloretos no betão depende de uma panóplia de fatores. Também o tempo de iniciação se encontra diretamente relacionado com diversos fatores tais como o grau de exposição a cloretos, a razão A-C, o tempo de cura, temperatura, o tipo de ligante e o recobrimento (Bioubakhsh, 2011). Tendo como base a 2ª lei de Fick da difusão dada na equação (27), apresenta-se a equação (38), que permite calcular o período de iniciação da corrosão das armaduras sob ação de cloretos:

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (38)$$

Resolvendo a equação em ordem a t , pode estimar-se o período de iniciação da corrosão, conhecendo o teor crítico de cloretos e fixando uma determinada espessura do recobrimento das armaduras, x .

O valor correspondente a C_s (concentração de cloretos à superfície) pode ser calculado, segundo a norma E 405 (LNEC, 2007), através da equação (39):

$$C_s = C_b \times k_{A/C} \times k_{vert} \times k_{hor} \times k_{temp} \quad (39)$$

Tabela 24 – Valores para o parâmetro k_{temp} , referente ao betão (LNEC, 2007)

0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
2,2	1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6

Tabela 25 – Valores dos parâmetros k_{vert} e k_{hor} para o cálculo de C_s (LNEC, 2007)

Classe de exposição		k_{vert}
XS2	XS1	0,7
	a 1 m de profundidade	1,0
	a 24 m de profundidade	1,4
	XS3	1,0
Distância à linha de costa		k_{hor}
	0	1
	1 km	0,6

Os coeficientes C_b e k são referentes ao betão e encontram-se tabelados na norma E 405 (LNEC, 2007). De acordo com Salta (1999), os valores de C_s são variáveis de autor para autor mas situam-se entre 4% e 5% até aos 10 metros de cota.

Em relação ao coeficiente de difusão do betão, D , pode ser estimado com auxílio da expressão (40) e das Tabelas 26 a 28, de acordo com a especificação E465 do LNEC (2007).

$$\begin{aligned}
 D_a(t) &= D_a(t_0) \times (t_0/t)^n = \\
 &= k_{D,c} \times k_{D,RH} \times k_{D,T} \times D_0 \times (t_0/t)^n = \\
 &= k \times (t_0/t)^n \times D_0
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

Onde:

$k_{D,c}$: fator que tem em conta a influência das condições de cura (Tabela 26);

$k_{D,RH}$: fator que tem em conta a influência da humidade relativa (Tabela 26);

$k_{D,T}$: fator que tem em conta a influência da temperatura (Tabela 27);

D_0 : coeficiente de difusão potencial, determinado de acordo com a Especificação E463 do LNEC (2004) em 5.4.5., com o betão na idade de referência $t_0=28$ dias [m^2/s];

n : fator que tem em conta o decréscimo de D ao longo do tempo (Tabela 28)

Tabela 26 – Valores para os parâmetros $k_{D,c}$ e $k_{D,RH}$ (LNEC, 2007)

Tipo de cura	$k_{D,c}$
Normalizada	2,4
Em contacto permanente com água	0,75
Cofragem de permeabilidade controlada e 3 dias de cura húmida	1,0
Classe de exposição	$k_{D,RH}$
XS1	0,4
XS2	1,0
XS3	1,0

Tabela 27 – Valores para o parâmetro $k_{D,T}$ (LNEC, 2007)

Temperatura do betão (°C)	0°	10°	15°	20°	25°	30°
$k_{D,T}$	0,4	0,75	0,8	1,0	1,2	1,5

Tabela 28 – Valores para o parâmetro n (LNEC, 2007)

Classe de exposição	n	
	CEM I / II	CEM III / IV / V
XS1	0,55	0,65
XS2	0,45	0,55
XS3	0,55	0,65

6.3.3.2. Período de propagação

O período de propagação compreende o tempo decorrido entre o início da corrosão do aço até que a estrutura atinge um nível de degradação inaceitável, a partir do qual se torna essencial proceder à sua rápida reparação (Salta, 1999). Esta degradação é desencadeada pela dissolução anódica do aço e da sua consequente redução de secção. Por outro lado, a formação de óxidos origina forças expansivas na armadura provocando, em última análise, a fissuração e o destacamento da camada de recobrimento de betão.

Segunda a norma E 465 (LNEC, 2007) este intervalo de tempo pode ser estimado com recurso a três formas:

- Com recurso à lei de Faraday:

$$x = 0,0115 \times I_{corr} \times t_p \quad (41)$$

Esta equação permite calcular a redução do raio x (mm) provocada pela intensidade da corrente de corrosão I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) durante o tempo de propagação da corrosão t_p (anos).

- Com recurso à expressão inicial de estima da redução de raio, x , que provoca a iniciação da corrosão:

$$x = 10^{-3} \times (74,5 + 7,3 R/\Phi_0 - 17,4 f_{cd}) \quad (42)$$

Onde R é o recobrimento (mm) e f_{cd} é a resistência à compressão diametral do betão com valores de 3 e 4 MPa nos betões para cloretos.

- Considerando diferentes influências na corrosão da carbonatação e da ação de cloretos. Sendo o diâmetro inicial Φ_0 das armaduras passivas reduzido, devido à corrosão, de αx :

$$\Phi_0 - \Phi = \alpha x$$

Ou

$$r_0 - r = (\alpha/2)x$$

(43)

(44)

Com $\alpha = 10$ quando a corrosão é por picadas, no caso da corrosão por ação de cloretos.

A redução do raio é então:

$$x = r_0 - r = k \times r_0/100 \quad (45)$$

Podendo assim reescrever-se a equação (43) sob a forma de:

$$t_p = k\Phi_0/(1,15\alpha I_{corr}) \quad (46)$$

E a expressão (44) sob a forma de:

$$k = 0,1 \times (74,5 + 7,3 R/\Phi_0 - 17,4 f_{cd})/(\Phi_0/2) \quad (47)$$

Com o auxílio das expressões (46) e (47), pode então ser estimado o período de propagação dos cloretos no betão. Para isso, devem ter-se em consideração os valores sugeridos para a

intensidade da corrente de corrosão, estimados a partir do nível de corrosão do betão, apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Valores de I_{corr} para cálculo do tempo de propagação (LNEC, 2007)

Intensidade da corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nível de corrosão
< 0,1	Desprezável
0,1 – 0,5	Baixo
0,5 – 1	Moderado
> 1	Elevado

6.4. Aplicação do modelo de propagação de cloretos no betão

Neste ponto pretende-se, com recurso ao Modelo de Tutti, apresentado em 6.3.3. e com o auxílio dos valores práticos de coeficientes de difusão apresentados em 5.5.5., aplicar o modelo de propagação de cloretos apresentado e desenvolvido na especificação E465 do LNEC (2007), efetuando uma estimativa do tempo de vida útil para os betões das três composições estudadas neste trabalho.

Inicialmente, com o auxílio das Tabelas 30 e 31, apresentadas de seguida, é selecionada a classe de exposição dos betões. Devido ao facto de, com o recurso ao modelo, se tentar obter uma correlação com o ensaio de imersão, a classe de exposição que mais fidedignamente representa o ambiente do ensaio trata-se da classe XS2, em que o betão se encontra total e permanentemente imerso.

Tabela 30 – Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar (LNEC, 2007)

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XD1	Moderadamente húmido	Betão armado em partes de pontes afastadas da ação dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Húmido, raramente seco	Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; piscinas.
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado diretamente afetados pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos. Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar.

Tabela 31 – Corrosão induzido por cloretos da água do mar (LNEC, 2007)

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com água do mar	Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais; Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios
XS2	Submersão permanente	Betão armado permanentemente submerso
XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos	Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos, desde 10 m acima do nível superior das marés até 1 m abaixo do nível inferior das marés. Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar.

De seguida e, com o auxílio do da especificação E465 do LNEC (2007), procede-se à determinação dos tempos de iniciação e propagação dos cloretos no betão.

Devido ao facto de o período de iniciação ser bastante superior quando comparado com o período de propagação, este é habitualmente, o único a ter em consideração no cálculo de períodos de vida útil de estruturas de betão. Este procedimento é também normalmente utilizado visto ser o mais conservativo no cálculo da durabilidade de uma estrutura.

Deste modo, depois da escolha da classe de exposição, atribuem-se valores às constantes apresentadas nas Tabelas 24 a 28 e, com o auxílio das equações (39), calcula-se o teor de cloretos à superfície do betão, C_s , um parâmetro que, como explicado anteriormente, é de extrema importância quando se pretende estimar a durabilidade de betões sob a ação de cloretos.

Ao contrário do ensaio de imersão, este modelo utiliza uma estimativa do coeficiente de difusão do betão para calcular os teores em cloretos para as diferentes profundidades. Desta forma e, com recurso aos resultados referentes aos coeficientes de difusão para cada betão obtidos com o auxílio do ensaio de migração rápida apresentados em 5.5.5., calcularam-se, com base na equação (40), os coeficientes de difusão, de acordo com o modelo, considerando que este diminui com o tempo de exposição.

Tabela 32 – Parâmetros para determinação do teor em cloretos nos betões

Composição	Classe	C _s (%)	Coefficiente de Difusão, D ₀ (m ² /s)	D _a (t)
C1	XS2	3,511	38,53 x 10 ⁻¹²	10,84 x 10 ⁻¹²
C2	XS2	3,511	14,85 x 10 ⁻¹²	4,18 x 10 ⁻¹²
C3	XS2	3,511	8,27 x 10 ⁻¹²	2,33 x 10 ⁻¹²

Por fim, aplicando a expressão (38), foram determinados os teores em cloretos para as diferentes profundidades de betão estudadas também experimentalmente, apresentados em conjunto nas Figuras 57 a 59.

Importa referir que, na aplicação deste modelo de propagação, as concentrações de cloretos obtidas e utilizadas são apresentadas em percentagem da massa de ligante enquanto no ensaio de imersão, a norma refere que estes valores devem ser apresentados em percentagem relativamente à massa de betão. Dado que, na análise experimental das amostras, o resultado obtido é em função da massa de betão, através da expressão (48), aplica-se uma relação entre os parâmetros para que, determinada a percentagem em função da massa de ligante, possa então ser comparada com os resultados obtidos analiticamente.

$$Cl_{ligante} = \frac{Cl_{betão} \times \gamma_c}{C} \quad (48)$$

Onde:

$Cl_{ligante}$: concentração de cloretos no ligante [%];

$Cl_{betão}$: concentração de cloretos no betão [%];

γ_c : massa específica do betão [kg/m³];

C : dosagem de cimento no betão [kg/m³].

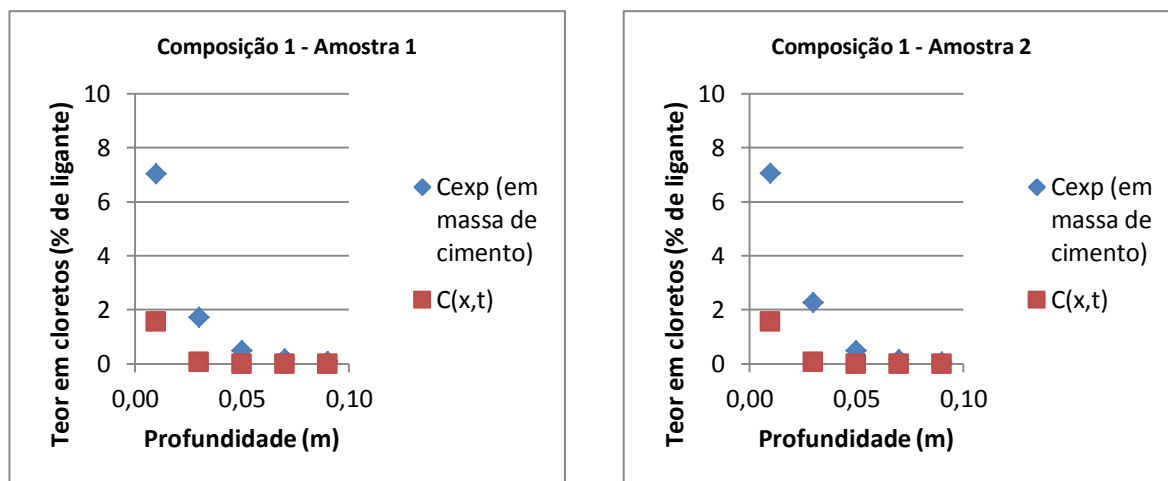


Figura 57 - Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 1)

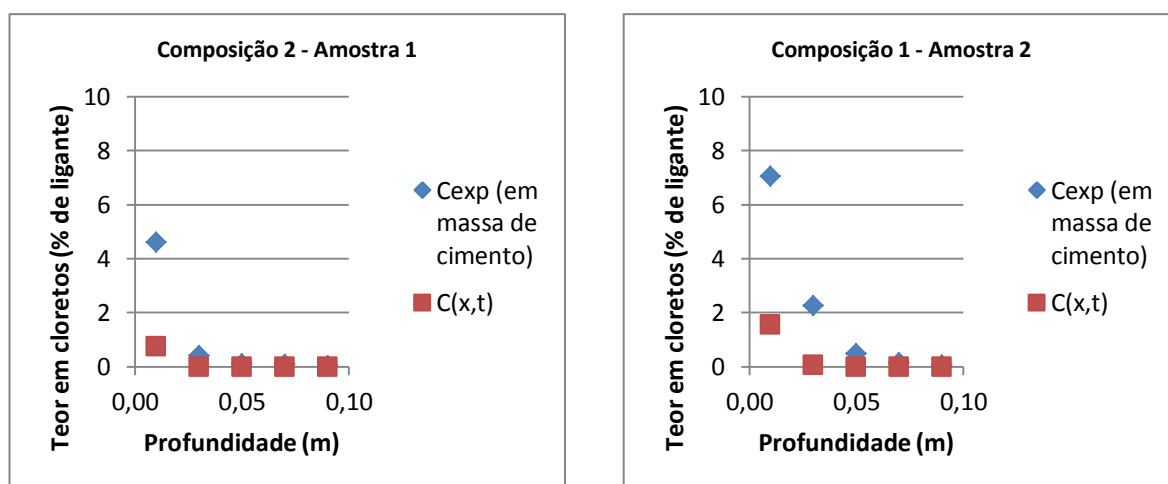


Figura 58 – Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 2)

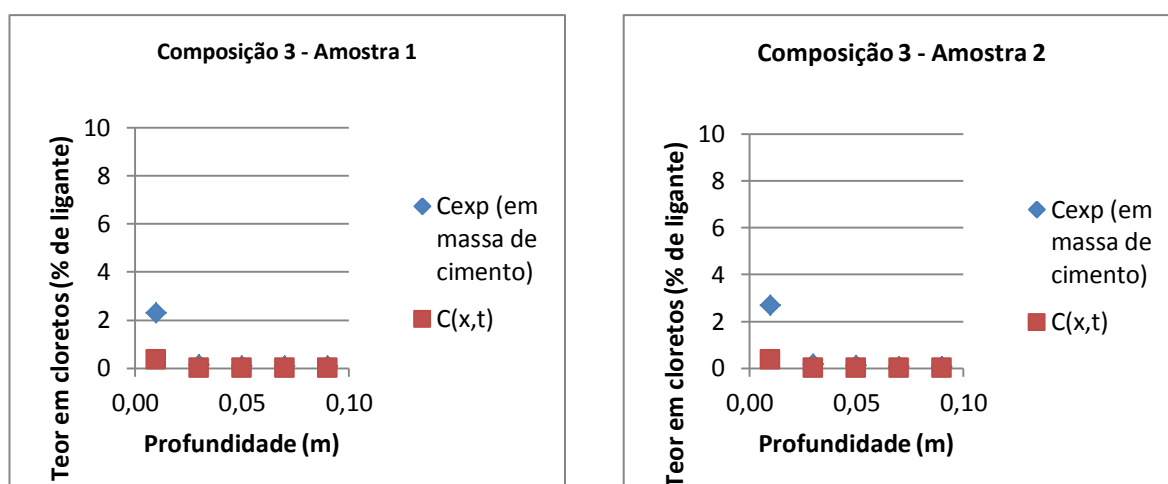


Figura 59 - Ensaio de imersão vs modelo de propagação de cloretos (Composição 3)

Analisando os gráficos das Figuras 57, 58 e 59, é possível verificar um teor em cloretos bastante superior no ensaio de imersão. Este resultado deve-se ao facto de concentração de cloretos de sódio (sal) na solução de imersão ser bastante superior àquela habitualmente adotada para a água do mar. Apesar deste facto, pode observar-se que os teores em cloretos diminuem bastante quando analisadas as composições com metacaulino devido ao facto de o coeficiente de difusão calculado através do ensaio de migração rápida ser também inferior.

7. CONCLUSÕES

Após a realização do estudo e analisados os resultados obtidos, pode concluir-se que a incorporação de metacaulino na composição do betão em substituição de uma percentagem do ligante é, indubitavelmente, benéfica no que concerne à melhoria das propriedades mecânicas do betão e também da sua durabilidade, nomeadamente relativamente ao ataque de iões cloreto.

Conclui-se que a densidade dos betões aumenta com o aumento da percentagem de metacaulino. Esta circunstância é devida ao efeito *filler* que o metacaulino apresenta no betão, que faz com que ocorra uma densificação da estrutura do betão, aumentando assim a densidade real e aparente.

Com recurso aos ensaios de determinação da resistência à compressão, conclui-se que ocorrem melhorias significativas desta propriedade com a presença de metacaulino. A composição com 10% de metacaulino apresenta um aumento de resistência à compressão na ordem dos 33% em relação à composição sem metacaulino ao passo que a composição com substituição de 20% apresenta melhorias na ordem dos 40%. Este facto deve-se fundamentalmente ao efeito filler do metacaulino e também devido à atividade pozolânica do material que desencadeia reações, que conduzem à rápida absorção do hidróxido de cálcio no processo de hidratação do betão, aumentando assim a sua resistência.

Através do ensaio de determinação da velocidade de propagação por ultra-sons, conclui-se que existe um aumento do módulo de elasticidade dinâmico do betão à medida que aumenta a percentagem de substituição do ligante.

Com recurso aos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, observa-se uma melhoria na resistência à absorção de água por imersão com o aumento da percentagem de metacaulino. Também no ensaio de absorção de água por capilaridade pode ver verificada uma diminuição na absorção de água nas composições com mais metacaulino e também uma diminuição na ascensão capilar.

O ensaio de migração rápida de cloretos (CTH Rapid Test Method) permitiu concluir que a substituição do ligante por metacaulino no betão conduz a melhorias substanciais na resistência do material à penetração de cloretos. Através dos resultados obtidos, é possível observar que, com o aumento da percentagem de metacaulino, o coeficiente de difusão do betão toma valores cada vez menores. A alteração da matriz do betão e a sua densificação quando à sua composição é adicionado metacaulino são fatores que podem contribuir para a

tendência registrada. Por outro lado, a reação química que ocorre entre os íons cloreto e o metacaulino, formando compostos como sal de Friedel, contribui também para a estabilização dos íons cloreto numa camada superficial do betão, densificando ao mesmo tempo esta camada e melhorando a resistência à penetração dos íons.

A mesma conclusão pode ser retirada com recurso ao ensaio de imersão onde se comprova, mais uma vez, a vantagem da utilização do metacaulino na composição do betão como forma de retardar a ação de íons cloreto.

Apesar de não ter sido possível a determinação do coeficiente de difusão do betão através do ensaio da célula de difusão devido aos fatores apresentados é, no entanto, possível registar uma tendência para uma diminuição dos teores em cloretos registados no ensaio, o que leva a concluir que, em sintonia com os restantes ensaios de penetração de cloretos, também neste a introdução de metacaulino conduz a uma melhoria na resistência dos betões a este agente agressivo.

Relativamente ao modelo teórico de propagação de cloretos no betão, pode afirmar-se que este não pode ser diretamente relacionado com o ensaio de imersão visto que, sendo as condições de exposição, nomeadamente a concentração de cloretos à superfície, de extrema importância na determinação de parâmetros de resistência aos ataques de cloretos, estas não podem ser comparadas em ambas as situações. As condições de exposição são bastante mais gravosas no caso do ensaio do que no modelo o que conduz à obtenção de teores em cloretos significativamente mais elevados.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Terminado o estudo, fica a ideia de este se tratar de um tema que pode ser amplamente estudado e desenvolvido. Posto isto, ficam as sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar o efeito do tempo e condições de cura e de exposição no fenómeno da difusão de cloretos, efetuando ensaios de maior duração e com diferentes curas.
- Apesar de o metacaulino apresentar vantagens indiscutíveis nas propriedades do betão, importa saber quais as percentagens ideais e a partir de quais a substituição pode, eventualmente, passar a ter efeito prejudicial. Sugere-se, portanto, a realização de betões com outras percentagens de metacaulino.

- A realização de ensaios alternativos de determinação de coeficientes de difusão.
- A análise de compostos formados a várias profundidades de forma a compreender a ação química do metacaulino que gera o fenómeno da diminuição da penetração de cloretos.
- Dado que o ensaio da célula de difusão não atingiu a totalidade dos objetivos pretendidos, sugere-se a repetição do ensaio a fim de perceber quais os fatores que podem ter tido influência no fracasso parcial do ensaio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrantes, A. V. P. (2011). *Comportamento do betão de cal hidráulica aditivado com metacaulino*. Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Andrade, C., Prieto, M., Tanner, P., Tavares, F., & d'Andrea, R. (2012). Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials*(0). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.012
- Andrade, J. J. d. O. (2001). *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Bioubakhsh, S. (2011). *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*. Doctoral, University College London.
- Boddy, A., Hooton, R. D., & Gruber, K. A. (2001). Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 759-765. doi: 10.1016/s0008-8846(01)00492-6
- Camões, A., Cruz, P. J. S., Jalali, S., & Ferreira, R. M. (2004). *Aumento da durabilidade do betão através da utilização de Metacaulino e Látex - Um caso de estudo*. Paper presented at the Encontro Nacional Betão Estrutural, Porto.
- Costa, A., & Appleton, J. (1999). Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marinho. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Série I - nº46*.
- Farnell, C. (2004). *Ultrasonic Pulse Velocity Testing - Technical Reference Manual*.
- Ferreira, R. M. (2000). *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*. Master, Universidade do Minho, Guimarães.
- Figueiredo, C. D. P. (2011). *O papel do metacaulino na proteção do betão contra a ação dos cloretos*. Mestrado Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Frohnsdorff, G. (1999). *Modelling Service Life and Life-Cycle Cost Steel-Reinforced Concrete*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

- Grace, W. R. (2006). Understanding AASHTO T277 and ASTM C1202 Rapid Chloride Permeability Test *Technical Bulletin TB-0100*. Cambridge: Grace Construction Products.
- Heirman, G., & Vandewalle, L. (2006). Chloride penetration and carbonation in self-compacting concrete. In K. Kovler (Ed.), *ConcreteLife'06 - International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh* (pp. 13 - 23): RILEM Publications SARL.
- Helene, P. R. L. (1993). *Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- International, A. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration *Cement Standards and Concrete Standards* (Vol. C1202-12). West Conshohocken: ASTM International.
- LNEC. (1993a). Determinação da absorção de água por capilaridade *Betões* (Vol. E393-1993). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1993b). Determinação da absorção de água por imersão *Betões* (Vol. E394-1993). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1993c). Determinação da Resistência à Penetração de Cloretos - Ensaio de Imersão *Betões* (Vol. E390-1993). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (1993d). Determinação da Resistência à Penetração de Cloretos - Método da célula de difusão *Betões* (Vol. E383-1993). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (2004). Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário *Betões* (Vol. E463-2004). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- LNEC. (2007). Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS *Betões* (Vol. E465-2007). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

- Page, C. L., Short, N. R., & El Tarras, A. (1981). Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 11(3), 395-406. doi: 10.1016/0008-8846(81)90111-3
- Pereira, L. d. F. L. d. C. (2001a). *Determinação de cloretos em concreto de cimentos Portland: Influência do tipo de cimento*. Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Pereira, V. G. Á. (2001b). *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: influência do tipo de cimento, da relação A/C, da temperatura e do tempo de cura*. Masters, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20(10), 858-865. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001
- Qian, X., & Li, Z. (2001). The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1607-1611. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00612-3
- Ramezaniapour, A. A., & Bahrami Jovein, H. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30(0), 470-479. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>
- Rizzon, A. C. (2006). *Determinação do coeficiente de difusão de cloretos e da vida útil de projeto de concretos moldados com cimento Portland branco*. Universidade Luterana do Brasil, Canoas.
- Salta, M. M. R. (1999). Resistência dos Betões à Penetração de Cloretos. Previsão do tempo de iniciação da corrosão nas estruturas. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43(3-4), 392-400. doi: 10.1016/j.clay.2008.11.007

- Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2012). Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test. *Cement and Concrete Research*, 42(8), 1072-1082. doi: 10.1016/j.cemconres.2012.04.007
- Stanish, K. D., Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A. (1997). Testing of Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*: FHWA Contract DTFH61-97-R-00022.
- Talero, R., Trusilewicz, L., Delgado, A., Pedrajas, C., Lannegrand, R., Rahhal, V., . . . Ramírez, F. A. (2011). Comparative and semi-quantitative XRD analysis of Friedel's salt originating from pozzolan and Portland cement. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2370-2380. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.037>
- Tang, L. (1996). *Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction*. Doctoral, Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Tavares, E. M. d. S. (2008). *Reacção pozolânica de metacaulinos e diatomites em argamassas de reabilitação*. Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Varela, R. H. D. (2010). *Corrosão das Armaduras em Betão Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação nas Edificações de Cabo Verde*. Licenciatura, Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, Cidade da Praia, Santiago, Cabo Verde.
- Xi, Y., & Bazant, Z. P. (1999). Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of Material in Civil Engineering*.
- Zhang, J., & Lounis, Z. (2006). Sensitivity analysis of simplified diffusion-based corrosion initiation model of concrete structures exposed to chlorides. *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1312-1323. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.015

ANEXO I

Tabela 33 – Granulometria dos agregados utilizados na produção do betão

Abertura de peneiro		Brita 12/25			Brita 8/12			Areia grossa			Areia fina		
		% Material Retido	% Retido Acumulado	% Passado Acumulado	% Material Retido	% Retido Acumulado	% Passado Acumulado	% Material Retido	% Retido Acumulado	% Passado Acumulado	% Material Retido	% Retido Acumulado	% Passado Acumulado
mm	$\sqrt[5]{d}$												
63,0	2,290	0	0	100	0	0	100	-	0	100	0,00	0,0	100,0
31,5	1,994	0	0	100	0	0	100	-	0	100	0,00	0,0	100,0
25,0	1,904	2,0	2,0	98,0	0	0	100	0	0	100	0,00	0,0	100,0
20,0	1,821	10,1	12,1	87,9	0	0	100	0	0	100	0,00	0,0	100,0
16,0	1,741	50,0	62,1	37,9	0	0	100	0	0,0	100,0	0,00	0,0	100,0
8,0	1,516	37,3	99,4	0,6	75,5	75,5	24,5	0,0	0,0	100,0	0,00	0,0	100,0
4,0	1,320	0,6	100,0	0	23,9	99,4	0,6	3,5	3,5	96,5	0,00	0,0	100,0
2,0	1,149	0	100,0	0	0,6	100	0	17,7	21,2	78,8	0,12	0,1	99,9
1,0	1,000	0	100,0	0	0	100	0	34,5	55,7	44,3	0,49	0,6	99,4
0,500	0,871	0	100,0	0	0	100	0	24,6	80,3	19,7	15,06	15,7	84,3
0,250	0,758	0	100,0	0	0	100	0	11,5	91,8	8,2	77,87	93,5	6,5
0,125	0,660	0	100,0	0	0	100	0	7,2	99,0	1,0	5,76	99,3	0,7
0,063	0,575	0	100,0	0	0	100	0	0,7	99,8	0,2	0,19	99,5	0,5
0,0065	0,365	0	100,0	0	0	100	0	0	99,8	0,2			

Tabela 34 – Composição do betão

Composição do Betão	
	(%)
Brita 12/25	32,0
Brita 8/12	22,0
Areia fina	14,6
Areia grossa	20,0
Cimento	11,4

ANEXO II

Tabela 35 – Resultados do ensaio de determinação da densidade aparente

	Composição 1 (Referência)				Composição 2 (10% MK)				Composição 3 (20% MK)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Volume (m ³)	0,001	0,001	0,001	Média	0,001	0,001	0,001	Média	0,001	0,001	0,001	Média
Massa (kg)	2,324	2,353	2,362		2,368	2,377	2,3828		2,395	2,396	2,411	
Densidade Aparente (kg/m ³)	2324,00	2353,00	2362,00	2346	2368,00	2377,00	2382,80	2376	2395,00	2396,00	2411,00	2401

Tabela 36 – Resultados do ensaio de determinação da densidade real

	Composição 1 (Referência)				Composição 2 (10% MK)				Composição 3 (20% MK)			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Peso Saturado (g)	2,413	2,426	2,421		2,450	2,449	2,404		2,454	2,444	2,463	
Peso Em Suspensão (g)	1,444	1,436	1,451		1,439	1,440	1,409		1,388	1,411	1,390	
Densidade água (ρ_w)	998			Média	998			Média	998			Média
Volume (m ³)	0,0010263	0,0010166	0,0010332		0,001013	0,001011	0,000998		0,001012	0,0010094	0,0010141	
Densidade Real (kg/m ³)	2350,88	2386,11	2343,28	2360	2419,26	2422,10	2409,85	2417	2424,94	2420,90	2429,08	2425

ANEXO III

Tabela 37- Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 1

	Composição 1 (Referência)			Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3			
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	20,50	25,10	23,00	22,87	2,30	10,07
Resistência à Compressão aos 60 dias (MPa)	27,50	27,50	25,20	26,73	1,33	4,97
Resistência à Compressão aos 90 dias (MPa)	27,60	26,10	26,60	26,77	0,76	2,85

Tabela 38 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 2

	Composição 2 (10% MK)			Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3			
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	28,20	32,60	30,70	30,50	2,21	7,24
Resistência à Compressão aos 60 dias (MPa)	32,70	34,40	34,20	33,77	0,93	2,75
Resistência à Compressão aos 90 dias (MPa)	37,20	35,20	38,80	37,07	1,80	4,87

Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência à compressão para a Composição 3

	Composição 3 (20% MK)			Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3			
Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	33,70	32,20	34,00	33,30	0,96	2,90
Resistência à Compressão aos 60 dias (MPa)	32,80	35,80	36,80	35,13	2,08	5,93
Resistência à Compressão aos 90 dias (MPa)	39,20	40,50	35,50	38,40	2,59	6,76

ANEXO IV

Tabela 40 – Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 1

	Composição 1 (Referência)			Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Tempo de propagação na direção 1 (μ s)	23,7	23,8	24,1	
Tempo de propagação na direção 2 (μ s)	23,4	23,6	23,8	
Média dos tempos de propagação (μ s)	23,55	23,7	23,95	
Velocidade de propagação (km/s)	4,246	4,219	4,175	4,214
Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d	38624			

Tabela 41- Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 2

	Composição 2 (10% MK)			Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Tempo de propagação na direção 1 (μ s)	23,1	24	22,3	
Tempo de propagação na direção 2 (μ s)	22,8	21,3	21,2	
Média dos tempos de propagação (μ s)	22,95	22,65	21,75	
Velocidade de propagação (km/s)	4,357	4,415	4,598	4,457
Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d	43348			

Tabela 42 - Resultados do ensaio de determinação de velocidade de propagação por ultra-sons para a Composição 3

	Composição 3 (20% MK)			Média
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
Tempo de propagação na direção 1 (μ s)	20,6	20,9	21,2	
Tempo de propagação na direção 2 (μ s)	22,2	21,3	21	
Média dos tempos de propagação (μ s)	21,4	21,1	21,1	
Velocidade de propagação (km/s)	4,673	4,739	4,739	4,717
Módulo de Elasticidade Dinâmico, E_d	47265			

ANEXO V

Tabela 43 – Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

	Composição 1 (Referência)			Composição 2 (10% MK)			Composição 3 (20% MK)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Absorção de água	10,069	7,942	6,479	8,807	7,661	2,207	5,871	4,844	5,132
Média	8,16			6,23			5,28		

Tabela 44 – Massa dos provetes registada para o ensaio de absorção de água por capilaridade

		M ₀	M ₃	M ₆	M ₂₄	M ₇₂
Composição 1	Amostra 1	12,474	12,497	12,506	12,531	12,555
	Amostra 2	12,513	12,542	12,551	12,578	12,605
Composição 2	Amostra 1	12,545	12,57	12,572	12,598	12,615
	Amostra 2	12,535	12,561	12,568	12,593	12,614
Composição 3	Amostra 1	12,417	12,432	12,435	12,445	12,456
	Amostra 2	12,411	12,429	12,432	12,447	12,46

Tabela 45 – Resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade

		A ₃	Média	A ₆	Média	A ₂₄	Média	A ₇₂	Média
C1	Amostra 1	0,001302	0,001471	0,001811	0,001981	0,003226	0,003452	0,004584	0,004895
	Amostra 2	0,001641		0,00215		0,003678		0,005206	
C2	Amostra 1	0,001415	0,001443	0,001528	0,001698	0,002999	0,003141	0,003961	0,004216
	Amostra 2	0,001471		0,001867		0,003282		0,00447	
C3	Amostra 1	0,000849	0,000934	0,001019	0,001103	0,001584	0,001811	0,002207	0,00249
	Amostra 2	0,001019		0,001188		0,002037		0,002773	

Tabela 46 – Valores de ascensão de água por capilaridade para o ensaio de absorção de água por capilaridade

		h ₃	Média	h ₆	Média	h ₂₄	Média	h ₇₂	Média
Composição 1	Amostra 1	32,0	30,5	30,0	33,5	55,0	57,0	65,0	64,5
	Amostra 2	29,0		37,0		59,0		64,0	
Composição 2	Amostra 1	26,0	27,0	29,0	31,5	53,0	55,5	62,0	63,5
	Amostra 2	28,0		34,0		58,0		65,0	
Composição 3	Amostra 1	17,0	19,0	23,0	24,5	24,0	29,5	35,0	40,0
	Amostra 2	21,0		26,0		35,0		45,0	

ANEXO VI

Tabela 47 – Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 1

Composição 1 - Amostra 1		Composição 1 - Amostra 2		Composição 1 - Amostra 3	
T	15,5	T	15,5	T	15,5
L	50	L	50	L	50
U	10	U	15	U	15
x _d	28,48143	x _d	41,92286	x _d	34,98857
t	24	t	24	t	24
x _{d1}	28,09	x _{d1}	42,84	x _{d1}	31,86
x _{d2}	29,01	x _{d2}	39,94	x _{d2}	35,46
x _{d3}	28,34	x _{d3}	44,46	x _{d3}	32,38
x _{d4}	28,85	x _{d4}	38,79	x _{d4}	37,71
x _{d5}	25,27	x _{d5}	38,45	x _{d5}	33,82
x _{d6}	30,01	x _{d6}	44,1	x _{d6}	38,69
x _{d7}	29,8	x _{d7}	44,88	x _{d7}	35
D	41,45696	D	40,65227	D	33,48023

Tabela 48 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 2

Composição 2 - Amostra 1		Composição 2 - Amostra 2		Composição 2 - Amostra 3	
T	15,5	T	15,5	T	15,5
L	50	L	50	L	50
U	25	U	30	U	30
x _d	32,40571	x _d	29,53286	x _d	27,77429
t	24	t	24	t	24
x _{d1}	30,12	x _{d1}	27,96	x _{d1}	28,76
x _{d2}	31,07	x _{d2}	29,95	x _{d2}	30,14
x _{d3}	31,32	x _{d3}	28,53	x _{d3}	27,01
x _{d4}	30,21	x _{d4}	31,81	x _{d4}	29,44
x _{d5}	33,14	x _{d5}	24,44	x _{d5}	23,95
x _{d6}	34,77	x _{d6}	31,28	x _{d6}	30,6
x _{d7}	36,21	x _{d7}	32,76	x _{d7}	24,52
D	18,12021	D	13,6452	D	12,78853

Tabela 49 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 28 dias para a Composição 3

Composição 3 - Amostra 1		Composição 3 - Amostra 2		Composição 3 - Amostra 3	
T	15,9	T	15,95	T	15,5
L	50	L	50	L	50
U	40	U	40	U	40
x _d	28,11286	x _d	21,58429	x _d	22,71
t	24	t	24	t	24
x _{d1}	25,35	x _{d1}	16,24	x _{d1}	15,33
x _{d2}	30,68	x _{d2}	18,04	x _{d2}	17,69
x _{d3}	26,7	x _{d3}	20,87	x _{d3}	23,71
x _{d4}	32,47	x _{d4}	20,91	x _{d4}	20,28
x _{d5}	21,67	x _{d5}	18,7	x _{d5}	20,87
x _{d6}	34,51	x _{d6}	25,12	x _{d6}	30,17
x _{d7}	25,41	x _{d7}	31,21	x _{d7}	30,92
D	9,710699	D	7,355803	D	7,749561

Tabela 50 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 1

Composição 1 - Amostra 1		Composição 1 - Amostra 2	
T	15,5	T	15,5
L	50	L	50
U	15	U	15
x _d	42,81143	x _d	35,41429
t	24	t	24
x _{d1}	44,2	x _{d1}	36,54
x _{d2}	43,45	x _{d2}	34,12
x _{d3}	46,91	x _{d3}	35,25
x _{d4}	38,34	x _{d4}	36,21
x _{d5}	45,17	x _{d5}	35,98
x _{d6}	38,35	x _{d6}	34,15
x _{d7}	43,26	x _{d7}	35,65
D	41,57434	D	33,91922

Tabela 51 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 2

Composição 2 - Amostra 1		Composição 1 - Amostra 2	
T	15,5	T	15,5
L	50	L	50
U	25	U	30
x _d	20,64286	x _d	28,93
t	24	t	24
x _{d1}	19,34	x _{d1}	27,14
x _{d2}	16,53	x _{d2}	29,78
x _{d3}	19,82	x _{d3}	30,51
x _{d4}	22,52	x _{d4}	28,25
x _{d5}	20,9	x _{d5}	27,12
x _{d6}	20,41	x _{d6}	30,29
x _{d7}	24,98	x _{d7}	29,42
D	11,20138	D	13,35137

Tabela 52 - Resultados do ensaio de migração rápida (CTH) aos 90 dias para a Composição 3

Composição 3 - Amostra 1		Composição 1 - Amostra 2	
T	15,5	T	15,5
L	50	L	50
U	30	U	30
x _d	14,46286	x _d	18,73
t	24	t	24
x _{d1}	14,85	x _{d1}	17,45
x _{d2}	15,3	x _{d2}	20,1
x _{d3}	11,97	x _{d3}	18,42
x _{d4}	15,19	x _{d4}	17,97
x _{d5}	13,36	x _{d5}	19,64
x _{d6}	16,35	x _{d6}	18,12
x _{d7}	14,22	x _{d7}	19,41
D	6,365941	D	8,409675

ANEXO VII

Tabela 53 – Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 1

Composição 1 - Amostra 1		
Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-
	(mV)	(mg/L)
1	236	3,60
2	216	8,24
3	234	3,91
4	234	3,91
5	236	3,60
9	199	16,68
12	201	5,16
16	198	5,98
19	204	4,45
22	202	4,91
25	204	4,45
28	218	7,59
32	214	8,96
35	210	10,57
39	207	11,97
42	203	14,13
45	206	12,48
50	203	14,13
55	191	23,24

Composição 1 - Amostra 2		
Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-
	(mV)	(mg/L)
1	214	2,73
2	217	2,35
3	217	2,35
4	217	2,35
5	216	2,47
9	213	2,86
12	215	2,60
16	213	2,86
19	213	9,33
22	214	8,96
25	205	13,01
28	203	14,13
32	200	16,00
35	232	4,25
39	232	4,25
42	227	5,22
45	215	8,59
50	200	16,00
55	199	16,68

Tabela 54 - Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 2

Composição 2 - Amostra 1		
Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-
	(mV)	(mg/L)
1	247	2,28
2	244	2,58
3	251	1,93
4	253	1,78
5	251	1,93
9	220	6,98
12	234	1,02
16	234	1,02
19	230	1,24
22	231	1,18
25	233	1,07
28	240	3,05
32	237	3,45
35	224	5,92
39	222	6,43
42	219	7,28
45	217	7,91
50	214	8,96
55	205	13,01

Composição 2 - Amostra 2		
Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-
	(mV)	(mg/L)
1	211	3,16
2	211	3,16
3	217	2,35
4	218	2,24
5	216	2,47
9	213	2,86
12	214	2,73
16	210	3,32
19	217	7,91
22	211	10,14
25	209	11,02
28	216	8,24
32	215	8,59
35	224	5,92
39	229	4,81
42	227	5,22
45	224	5,92
50	217	7,91
55	211	10,14

Tabela 55 - Resultados do ensaio da célula de difusão para a Composição 3

Composição 3 - Amostra 1			Composição 3 - Amostra 2		
Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-	Dia de Recolha	f.e.m.	Cl-
	(mV)	(mg/L)		(mV)	(mg/L)
1	239	3,18	1	221	6,70
2	246	2,38	2	227	5,22
3	244	2,58	3	229	4,81
4	245	2,48	4	231	4,43
5	245	2,48	5	233	4,07
9	230	4,61	9	210	10,57
12	228	1,37	12	208	3,66
16	225	1,59	16	213	2,86
19	220	2,03	19	202	4,91
22	220	2,03	22	207	3,84
25	215	2,60	25	199	5,69
28	223	6,17	28	215	8,59
32	221	6,70	32	213	9,33
35	217	7,91	35	212	9,73
39	215	8,59	39	210	10,57
42	215	8,59	42	208	11,49
45	231	4,43	45	215	8,59
50	229	4,81	50	214	8,96
55	227	5,22	55	214	8,96

ANEXO VIII

Tabela 56 – Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 1

Teor de Cloretos no Betão aos 30 dias (Composição 1)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C1A1 (0-2)	165	68,3	9,16	500	50	3729	0,373
C1A1 (2-4)	200	16,0	10,12	500	50	791	0,079
C1A1 (4-6)	234	3,9	10,19	500	50	192	0,019
C1A1 (6-8)	245	2,5	10,15	500	50	122	0,012
C1A1 (8-10)	253	1,8	10,16	500	50	87	0,009

C1A2 (0-2)	166	65,5	10,24	500	50	3200	0,320
C1A2 (2-4)	214	9,0	10,20	500	50	439	0,044
C1A2 (4-6)	242	2,8	10,05	500	50	140	0,014
C1A2 (6-8)	246	2,4	10,11	500	50	118	0,012
C1A2 (8-10)	250	2,0	8,47	500	50	119	0,012

Tabela 57 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 1

Teor de Cloretos no Betão aos 60 dias (Composição 1)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C1A1 (0-2)	163	74,2	10,02	500	50	3703	0,370
C1A1 (2-4)	189	25,3	10,20	500	50	1238	0,124
C1A1 (4-6)	225	5,7	10,31	500	50	275	0,028
C1A1 (6-8)	245	2,5	10,34	500	50	120	0,012
C1A1 (8-10)	253	1,8	10,34	500	50	86	0,009

C1A2 (0-2)	154	107,8	10,24	500	50	5263	0,526
C1A2 (2-4)	159	87,6	10,20	500	50	4294	0,429
C1A2 (4-6)	238	3,3	10,05	500	50	165	0,016
C1A2 (6-8)	246	2,4	10,10	500	50	118	0,012
C1A2 (8-10)	251	1,9	10,26	500	50	94	0,009

Tabela 58 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 1

Teor de Cloretos no Betão aos 90 dias (Composição 1)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C1A1 (0-2)	142	177,3	10,07	500	50	8802	0,880
C1A1 (2-4)	175	45,1	10,45	500	50	2159	0,216
C1A1 (4-6)	206	12,5	10,24	500	50	609	0,061
C1A1 (6-8)	229	4,8	10,07	500	50	239	0,024
C1A1 (8-10)	250	2,0	10,05	500	50	100	0,010

C1A2 (0-2)	142	177,3	10,04	500	50	8829	0,883
C1A2 (2-4)	169	57,9	10,19	500	50	2839	0,284
C1A2 (4-6)	206	12,5	10,20	500	50	612	0,061
C1A2 (6-8)	232	4,2	10,02	500	50	212	0,021
C1A2 (8-10)	254	1,7	10,11	500	50	84	0,008

Tabela 59 - Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 2

Teor de Cloretos no Betão aos 30 dias (Composição 2)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C2A1 (0-2)	180	36,7	10,10	500	50	1815,6	0,182
C2A1 (2-4)	245	2,5	9,16	500	50	135,2	0,014
C2A1 (4-6)	249	2,1	9,80	500	50	107,0	0,011
C2A1 (6-8)	250	2,0	10,56	500	50	95,3	0,010
C2A1 (8-10)	253	1,8	10,23	500	50	86,9	0,009

C2A2 (0-2)	172	51,1	10,23	500	50	2497,6	0,250
C2A2 (2-4)	247	2,3	10,16	500	50	112,2	0,011
C2A2 (4-6)	249	2,1	10,32	500	50	101,7	0,010
C2A2 (6-8)	250	2,0	10,09	500	50	99,7	0,010
C2A2 (8-10)	252	1,9	10,49	500	50	88,3	0,009

Tabela 60 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 2

Teor de Cloretos no Betão aos 60 dias (Composição 2)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C2A1 (0-2)	176	43,3	10,07	500	50	2149,5	0,215
C2A1 (2-4)	241	2,9	10,24	500	50	142,7	0,014
C2A1 (4-6)	252	1,9	10,14	500	50	91,4	0,009
C2A1 (6-8)	260	1,3	10,52	500	50	63,2	0,006
C2A1 (8-10)	271	0,8	10,13	500	50	41,6	0,004

C2A2 (0-2)	165	68,3	10,22	500	50	3341,9	0,334
C2A2 (2-4)	244	2,6	10,49	500	50	123,0	0,012
C2A2 (4-6)	247	2,3	10,43	500	50	109,3	0,011
C2A2 (6-8)	258	1,4	10,26	500	50	70,4	0,007
C2A2 (8-10)	267	1,0	10,12	500	50	49,1	0,005

Tabela 61 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 2

Teor de Cloretos no Betão aos 90 dias (Composição 2)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C2A1 (0-2)	151	122,1	10,58	500	50	5769	0,577
C2A1 (2-4)	210	10,6	10,28	500	50	514	0,051
C2A1 (4-6)	242	2,8	10,53	500	50	133	0,013
C2A1 (6-8)	247	2,3	10,22	500	50	112	0,011
C2A1 (8-10)	260	1,3	10,42	500	50	64	0,006

C2A2 (0-2)	153	112,3	10,01	500	50	5612	0,561
C2A2 (2-4)	207	12,0	10,15	500	50	590	0,059
C2A2 (4-6)	240	3,0	10,17	500	50	150	0,015
C2A2 (6-8)	254	1,7	10,24	500	50	83	0,008
C2A2 (8-10)	259	1,4	10,02	500	50	69	0,007

Tabela 62 - Resultados do ensaio de imersão aos 30 dias para a Composição 3

Teor de Cloretos no Betão aos 30 dias (Composição 3)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C3A1 (0-2)	229	4,8	10,06	500	50	239,0	0,024
C3A1 (2-4)	238	3,3	10,38	500	50	159,5	0,016
C3A1 (4-6)	245	2,5	10,04	500	50	123,3	0,012
C3A1 (6-8)	247	2,3	10,28	500	50	110,9	0,011
C3A1 (8-10)	255	1,6	10,40	500	50	78,7	0,008

C3A2 (0-2)	218	7,6	10,12	500	50	374,9	0,037
C3A2 (2-4)	245	2,5	10,32	500	50	120,0	0,012
C3A2 (4-6)	250	2,0	9,97	500	50	100,9	0,010
C3A2 (6-8)	252	1,9	10,10	500	50	91,7	0,009
C3A2 (8-10)	260	1,3	10,03	500	50	66,3	0,007

Tabela 63 - Resultados do ensaio de imersão aos 60 dias para a Composição 3

Teor de Cloretos no Betão aos 60 dias (Composição 3)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	

C3A1 (0-2)	180	36,7	10,40	500	50	1763,2	0,176
C3A1 (2-4)	251	1,9	10,09	500	50	95,7	0,010
C3A1 (4-6)	260	1,3	10,12	500	50	65,7	0,007
C3A1 (6-8)	262	1,2	10,05	500	50	60,9	0,006
C3A1 (8-10)	276	0,7	10,58	500	50	32,4	0,003

C3A2 (0-2)	164	71,2	10,12	500	50	3517,8	0,352
C3A2 (2-4)	250	2,0	10,26	500	50	98,1	0,010
C3A2 (4-6)	255	1,6	10,07	500	50	81,2	0,008
C3A2 (6-8)	263	1,2	10,22	500	50	57,4	0,006
C3A2 (8-10)	266	1,0	10,18	500	50	50,9	0,005

Tabela 64 - Resultados do ensaio de imersão aos 90 dias para a Composição 3

Teor de Cloretos no Betão aos 90 dias (Composição 3)							
Amostras	f.e.m.	Cl-	toma amostra	balão	toma	Cl-	Teor em % de betão
	(mV)	(mg/L)	(g)	(ml)	(ml)	(mg/kg)	
C3A1 (0-2)	169	57,9	10,10	500	50	2865	0,286
C3A1 (2-4)	241	2,9	10,13	500	50	144	0,014
C3A1 (4-6)	249	2,1	10,19	500	50	103	0,010
C3A1 (6-8)	254	1,7	10,12	500	50	84	0,008
C3A1 (8-10)	257	1,5	10,04	500	50	75	0,007
C3A2 (0-2)	165	68,3	10,26	500	50	3329	0,333
C3A2 (2-4)	235	3,7	10,10	500	50	186	0,019
C3A2 (4-6)	246	2,4	10,73	500	50	111	0,011
C3A2 (6-8)	256	1,6	10,50	500	50	75	0,007
C3A2 (8-10)	260	1,3	10,31	500	50	64	0,006

Tabela 65 – Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 1

Composição 1 - Amostra 1	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	0,298	0,327	0,863	0,880	0,00028666
	(2-4)	0,03	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	0,893	0,793	0,268	0,216	0,00272993
	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	1,488	0,965	0,049	0,061	0,00014782
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	2,083	0,996	0,009	0,024	0,00023033
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	2,678	1,000	0,004	0,010	3,1331E-05
											0,00342607
Composição 1 - Amostra 2	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	0,298	0,327	0,863	0,883	0,00038265
	(2-4)	0,03	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	0,893	0,793	0,268	0,284	0,00024966
	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	1,488	0,965	0,049	0,061	0,00015368
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	2,083	0,996	0,009	0,021	0,00015598
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	3,63E-11	2,678	1,000	0,004	0,008	1,6133E-05
											0,0009581

Tabela 66 - Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 2

Composição 2 - Amostra 1	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	0,536	0,551	0,576	0,577	1,6072E-07
	(2-4)	0,03	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	1,607	0,977	0,033	0,051	0,00032684
	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	2,679	1,000	0,004	0,013	7,9234E-05
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	3,750	1,000	0,004	0,011	5,1059E-05
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	4,822	1,000	0,004	0,006	5,6657E-06
											0,00046296
Composição 2 - Amostra 2	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	0,536	0,551	0,576	0,561	0,00023327
											0,00065716

	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	2,679	1,000	0,004	0,015	0,00011162
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	3,750	1,000	0,004	0,008	1,866E-05
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	1,12E-11	4,822	1,000	0,004	0,007	8,5024E-06
											0,00102921

Tabela 67 - Determinação do teor em cloretos pelo ensaio de imersão para a Composição 3

	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
Composição 3 - Amostra 1	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	0,836	0,763	0,307	0,286	0,00042241
	(2-4)	0,03	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	2,508	0,999	0,005	0,014	9,2067E-05
	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	4,180	1,000	0,004	0,010	3,9609E-05
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	5,852	1,000	0,004	0,008	1,9583E-05
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	7,524	1,000	0,004	0,007	1,2244E-05
											0,00058591
	Profundidade	x	t	C ₀	C _s	D	$((1/2x)/\sqrt{(Dt)})$	erf(z)	C _x	C _{x (experimental)}	$\sum(C_x - C_{x,e})^2$
Composição 3 - Amostra 2	(0-2)	0,01	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	0,836	0,763	0,307	0,333	0,00066853
	(2-4)	0,03	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	2,508	0,999	0,005	0,019	0,0001884
	(4-6)	0,05	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	4,180	1,000	0,004	0,011	4,9992E-05
	(6-8)	0,07	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	5,852	1,000	0,004	0,007	1,207E-05
	(8-10)	0,09	7776000	0,004	1,28	4,6E-12	7,524	1,000	0,004	0,006	5,9954E-06
											0,00092499

ANEXO IX

Tabela 68 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 1

	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 1 - Amostra 1	0,01	7776000	0,880	7,042	3,511	38,530	10,839	0,545	0,559	1,549
	0,03	7776000	0,216	1,727	3,511	38,530	10,839	1,634	0,979	0,073
	0,05	7776000	0,061	0,487	3,511	38,530	10,839	2,723	1,000	0,001
	0,07	7776000	0,024	0,191	3,511	38,530	10,839	3,812	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,010	0,080	3,511	38,530	10,839	4,902	1,000	0,000
	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 1 - Amostra 2	0,01	7776000	0,883	7,063	3,511	38,530	10,839	0,545	0,559	1,549
	0,03	7776000	0,284	2,272	3,511	38,530	10,839	1,634	0,979	0,073
	0,05	7776000	0,061	0,489	3,511	38,530	10,839	2,723	1,000	0,001
	0,07	7776000	0,021	0,169	3,511	38,530	10,839	3,812	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,008	0,067	3,511	38,530	10,839	4,902	1,000	0,000

Tabela 69 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 2

	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 2 - Amostra 1	0,01	7776000	0,577	4,615	3,511	14,850	4,177	0,877	0,785	0,755
	0,03	7776000	0,051	0,411	3,511	14,850	4,177	2,632	1,000	0,001
	0,05	7776000	0,013	0,107	3,511	14,850	4,177	4,386	1,000	0,000
	0,07	7776000	0,011	0,089	3,511	14,850	4,177	6,141	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,006	0,051	3,511	14,850	4,177	7,896	1,000	0,000
	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 2 - Amostra 2	0,01	7776000	0,561	4,489	3,511	14,850	4,177	0,877	0,785	0,755
	0,03	7776000	0,059	0,472	3,511	14,850	4,177	2,632	1,000	0,001
	0,05	7776000	0,015	0,120	3,511	14,850	4,177	4,386	1,000	0,000
	0,07	7776000	0,008	0,067	3,511	14,850	4,177	6,141	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,007	0,055	3,511	14,850	4,177	7,896	1,000	0,000

Tabela 70 - Determinação do teor em cloretos pelo modelo de propagação para a Composição 3

	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 3 - Amostra 1	0,01	7776000	0,286	2,292	3,511	8,270	2,326	1,176	0,904	0,337
	0,03	7776000	0,014	0,115	3,511	8,270	2,326	3,527	1,000	0,000
	0,05	7776000	0,010	0,082	3,511	8,270	2,326	5,878	1,000	0,000
	0,07	7776000	0,008	0,067	3,511	8,270	2,326	8,229	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,007	0,060	3,511	8,270	2,326	10,580	1,000	0,000
	X	t	C _{experimental}	C _{exp} (em massa de cimento)	C _s	D ₀ x10 ⁻¹²	D _a (t)	z	erf(z)	C(x,t)
Composição 3 - Amostra 2	0,01	7776000	0,333	2,663	3,511	8,270	2,326	1,176	0,904	0,337
	0,03	7776000	0,019	0,148	3,511	8,270	2,326	3,527	1,000	0,000
	0,05	7776000	0,011	0,089	3,511	8,270	2,326	5,878	1,000	0,000
	0,07	7776000	0,007	0,060	3,511	8,270	2,326	8,229	1,000	0,000
	0,09	7776000	0,006	0,052	3,511	8,270	2,326	10,580	1,000	0,000